République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université BADJI Mokhtar – Annaba

Faculté de Médecine

****

ETUDE ANATOMO-RADIOLOGIQUE DE LA MATURATION SQUELETTIQUE DE L'ENFANT ET DE L'ADOLESCENT DANS LA WILAYA D'ANNABA :

INTERET DANS L'ESTIMATION DE L'AGE OSSEUX DANS UN BUT MEDICAL ET MEDICO-LEGAL

Thèse pour l'obtention du grade de Docteur En Sciences Médicales (DESM)

Présentée et Soutenue publiquement le 17/04/2025

Par : Dr Abdeldjalil ABDALLAH

Maître-assistant en Anatomie Normale

N° d'Ordre : 2719/23

Membres du Jury

- Président	: Pr. MAHDADI Salah	Université de Sétif
- Directeur	: Pr. DANOUNE Abdelmalek	Université de Béjaia
- Examinateur	: Pr. BOUKOFFA Sacia	Université d'Annaba
- Examinateur	: Pr. BOUCHAIR-Tourab Nadira	Université d'Annaba
- Examinateur	: Pr. MELLOUKI Youcef	Université d'Annaba
- Examinateur	: Pr. TOUIA Fatima Zohra	Université d'Alger

« C’est le développement anatomique de la main qui donne à la main humaine sa place ; elle est non seulement une pince, organe de préhension, mais aussi un instrument agile et discipliné du cerveau qui ordonne.

« Agent d’exécution, elle contribue à conférer à l'homme une situation privilégiée parmi les primates. Le développement du cerveau de l'homme est évidemment indispensable pour réaliser cette évolution, son rôle apparaît dans les différents aspects de l'acte volontaire. Le couple main-cerveau marche alors du même pas.

« L’apparition progressive de points d'ossification dans une région aussi particulière que la main, est, à cause de cela et pour qui l’observe, d'un enseignement incomparable si l'on veut comprendre l'homme en général et dans le cours de sa vie individuelle. Je me suis souvent demandé, devant les potentialités cachées de cette main d'enfant, ce que la connaissance de sa morphogénèse devrait nous apporter, ce que pourrait apporter, par exemple, l’étude du squelette de la main et des doigts des jeunes artistes, des enfants prodiges, celle seulement de la jeune dactylographe.

« Quelle a été la main de Mozart enfant et celle de tous ceux dont la main est l'organe d'une activité spécialisée, la main et les doigts d'un horloger, d'un chirurgien ? Quand et comment cet outil commence-t-il à présenter les particularités d'une main fonctionnellement achevée ? Nous ne connaissons pas l'anatomie des différentes mains, mais seulement celle de « la main ». Que peuvent nous apprendre les indicateurs de maturation sur ce qui est donné et ce qui est acquis ou subi ? »

D’après la Préface de :
« Atlas de la maturation squelettique » SEMPE M., PAVIA C.



Professeur André DELMAS (1910-1999)
Anatomiste français
Ex-Membre de l’Académie Nationale de Médecine
Ex-Directeur de l'École pratique d'anatomie

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À l'âme de ma Mère Khoudjia, à mon Père Ferhat
À mon Épouse Sabah
À mes chers Enfants : Rahaf, Ranim, Taha, Rafif et Rouae
À l'âme de mon Frère Hocine, à la volonté de mon Frère Salah, à mes Sœurs Nadia, Fadia et Lamia… À leurs époux, leurs Enfants et leurs petits Enfants
À l'âme de mon Beau-père Foudil, à ma Belle-mère Zahra
À mes Belles-sœurs Kamir et Rachida, à mes Beaux-frères Tamim, Larbi et Kamel… À leurs époux et épouses, leurs Enfants et leurs petits Enfants
À mes Tantes et mes Oncles, aux âmes de celles et ceux qui nous ont quitté

Aux Enfants et aux Adolescents qui ont constitué notre échantillon d'étude, qui sont aujourd'hui pour la plupart des lycéens et des universitaires, et à leurs Parents, pour leur participation dans la réalisation de cette étude

À mes Frères de l'âme, à mes Amis
À Tous et Toutes mes Collègues
À Tous mes Maîtres
À mes étudiants

Remerciements

À monsieur le Professeur **DANOUNE Abdelmalek**
Chef de Service d'Anatomie médico-chirurgicale à la Faculté de Médecine de Béjaia
…qui m'a proposé le thème d' « âge osseux » et qui a assuré la direction scientifique de mes travaux de recherche. Vos qualités humaines et votre disponibilité tout au long de ces années sont pour moi un exemple. Votre compétence scientifique, votre grande expérience et vos conseils m'ont poussé à aller loin et profondément dans mon travail. Trouvez ici l'expression de ma gratitude et ma grande considération

À monsieur le Professeur **MAHDADI Salah**
Chef de Service d'Anatomie médico-chirurgicale à la Faculté de Médecine de Sétif
Je suis très honorée que vous présidez le Jury de ma Soutenance malgré vos multiples occupations, vos propos et conseils m'ont donné l'enthousiasme pour finaliser mon travail. Merci beaucoup

À madame le Professeur **BOUKOFFA Sacia**
Cheffe de Service d'Anatomie médico-chirurgicale à la Faculté de Médecine d'Annaba
Je suis très heureux de vous compter parmi le Jury de ma Soutenance, vous avez accompagné mon travail depuis sa genèse, et vous avez laissé vos traces sur toutes mes communications sur l' « âge osseux » présentées dans les congrès internationaux. Merci beaucoup

À madame le Professeur **BOUCHAIR-Tourab Nadira**
Médecin-Cheffe du service de pédiatrie « Sainte Thérèse », CHU Annaba
Je suis très heureux que vous acceptiez ma demande et que vous soyez parmi le Jury de ma Soutenance, comme vous étiez avant parmi mes enseignants à l'INES-SM de Constantine, il y a 29 ans. Merci beaucoup pour l'intérêt que vous portez à la recherche scientifique et à la rigueur de travail. Merci beaucoup

À monsieur le Professeur **MELLOUKI Youcef**
Professeur en Médecine légale au CHU d'Annaba et Président du Conseil Scientifique de la Faculté de Médecine d'Annaba
Je suis très honorée que vous ayez accepté d'être membre du jury malgré vos nombreuses préoccupations. Je vous remercie également de l'intérêt que vous avez apporté à mon travail et de votre soutien. Merci beaucoup

À madame le Professeur **TOUIA Fatima Zohra**
Professeur en Anatomie Normale à la Faculté de Médecine d'Alger et Spécialiste en Imagerie Médicale au CHU d'Alger
Je suis très heureux que vous soyez parmi le Jury de ma soutenance. Vous m'avez aidé énormément dans la finalisation de la partie « Imagerie », vos conseils et encouragements ont contribué à perfectionner mon travail. Merci beaucoup

Mes **Remerciements** aussi à d'autres Professeurs et Collègues qui ont contribué à la réalisation de ce Travail :

- Pr. BOUKADOUM, Professeur en Imagerie Médicale
- Dr. TOUATI, Docteur en Imagerie Médicale
- Dr. AISSANI, Docteur en Imagerie Médicale (clinique al-Farabi)
- Dr. BOUHOUCHE, Médecin généraliste à l'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » d'Annaba
- Dr. SOUSSA, Maître-assistante en Anatomie Normale à la Faculté de Médecine d'Annaba et Spécialiste en Imagerie Médicale au CHU d'Annaba
- Dr. BELHOUCHET, Maître-assistante en Anatomie Normale à la Faculté de Médecine d'Annaba et Spécialiste en Imagerie Médicale au CHU d'Annaba
- Pr. GOURI, Professeur en Biochimie, CHU Annaba
- Madame Rachida, technicienne en Radiologie à l'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » d'Annaba
- Madame Hamida, technicienne en Radiologie à la clinique al-Farabi

Pensée

Attachées à mon travail, deux personnes qui nous ont quitté vers la vie éternelle

Le Docteur **YAICHE Mohamed Cherif**

Décédé le 7 janvier 2019

Il était Médecin-Chef de l'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse », CHU Annaba

Il m'a accueilli dans son service, et il m'a consacré son temps et sur plusieurs rencontres afin de planifier le recrutement pour ma thèse des enfants et des adolescents consultants

Il avait un esprit scientifique, il était modeste et généreux

Le Professeur **SEMPÉ Michel**

Décédé le 26 septembre 2020

Il était Ancien Externe des Hôpitaux de Paris, Pédiatre Maître de Recherches Professeur associé des Universités, Expert près de la Cour d'Appel de Lyon

Il m'a soutenu dans mon travail, il a commenté mon plan de sujet et m'a offert ses livres et ses communications sur la maturation squelettique.

Il avait un esprit scientifique, il était modeste et généreux

TABLE
DES MATIÈRES

Dédicaces, Remerciements, Pensée
Table des matières i
Liste des figures viii
Liste des tableaux vxii
Liste des abréviations xxi

INTRODUCTION 1
La problématique et Les objectifs 3

PARTIE THÉORIQUE

LES PROLÉGOMÈNES : des Notions et des Définitions 10
I- Terminologie 11
1- La croissance 11
2- La maturation 14
3- Le développement 17
II- Stades du développement humain 18
1- Période prénatale 18
2- Période d'enfance 19
3- Période d'adolescence 20
4- Age adulte 24
III- Paramètres de la croissance 25
1- Taille 25
2- Poids 29
3- Indice de masse corporelle (IMC) 30
4- Autres paramètres 32
5- Au total : comment mener une enquête auxologique ? 33
IV- L'âge et sa détermination 36
1- Définition de l' « âge » 36
2- Filières de fixation de l' « âge » 36
3- Différents types d' « âge » et leur détermination 37
4- Au total : comment déterminer un âge ? 41
V- L'évaluation de la maturation squelettique et l'éthique 44
1- Le risque lié à l'irradiation radiologique 44
2- L'imprécision des techniques actuelles pour l'évaluation de la maturation osseuse 44
3- Respect, information et consentement du mineur (étranger, isolé) 45
4- « Détournement » des méthodes à but médical à des fins judiciaires 47
5- Conclusion et recommandations 48
CHAPITRE I : DEVELOPPEMENTS EMBRYONNAIRE ET MATURATIF DU SQUELETTE OSSEUX APPENDICULAIRE 49
I.1. Le squelette osseux appendiculaire : le substratum de l'évaluation de la maturation osseuse 50
1- L'ostéogénèse... la formation de l'os 50
2- La maturation osseuse… l'âge de l'os 51

3- L'ostéogénèse et la maturation osseuse : deux faces d'une même pièce 52
I.2. Développement embryonnaire normal du squelette appendiculaire (au membre thoracique) chez l'Homme 54
1- Les débuts... 54
2- Formation des bourgeons du membre thoracique..... 55
3- Formation des segments du membre thoracique 56
4- Formation des os du membre thoracique..... 56
5- Aspects évolutifs des os embryonnaires du squelettique du membre thoracique 59
I. 3. Le développement maturatif normal du squelette appendiculaire chez l'enfant et l'adolescent 62
1- Ossification secondaire des os du squelette appendiculaire 62
2- Calendrier postnatal d'apparition et de fusion des points d'ossification des os du squelette appendiculaire 63
I. 4. Les facteurs influençant la maturation osseuse 74
1. Introduction 74
2. Classification 74
3. Intrication des facteurs 92
CHAPITRE II : L'IMAGERIE ET L'ÉTUDE DE LA MATURATION OSSEUSE 94
II.1. La place des articulations des membres dans l'étude de la maturation osseuse chez l'enfant et l'adolescent 95
II.2. La place de l'imagerie dans l'appréciation de la maturation du squelette appendiculaire humain 96
1- La radiographie standard 98
2- L'échographie 118
3- La tomodensitométrie (TDM) 125
4- L'imagerie par résonance magnétique (IRM) 133
5- La scintigraphie osseuse 155
6- Conclusion 158
II.3. Anatomie radiologique des structures ostéo-articulaires des membres et leurs aspects évolutifs en postnatal :
1. La clavicule 159
2. L'épaule 161
3. Le coude 163
4. Le poignet et la main 166
5. Le bassin, la crête iliaque et la hanche 169
6. Le genou 173
7. La cheville et le pied 175
CHAPITRE III : INTERETS MEDICAUX ET MEDICO-LEGAUX DE L'ESTIMATION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE 180
III.1. L' « âge osseux » comme déterminant de l'état de maturation squelettique chez l'homme 181
III.2. Intérêts médicaux de l'estimation de la maturation squelettique 183
1. Les excès de croissance 184
2. Les retards de croissance 185
3. Les pubertés précoces 188
4. Les retards de puberté 188

5. Les inégalités de longueurs des membres pelviens 188
6. La scoliose 189
III.3. Intérêts médico-légaux de l'estimation de la maturation squelettique 191
1. L' « enfant » dans la législation 192
2. Les domaines d'application 194
III.4. Deux autres intérêts de l'estimation de la maturation squelettique : L'école et Le sport 214
1- A l'école 214
2- Au sport 215
III.5. Limites de la précision et de la fiabilité de l'âge osseux appliqué à des fins médicale et médico-légale 220
1. Les variabilités individuelles 221
2. Le conflit de spécificités entre le « Médical » et le « Juridique » 222
3. L'ancienneté et la nature d'échantillonnage des méthodes d'évaluation 225
4. La subjectivité de la lecture du cliché radiographique 227
5. Le manque de qualité du cliché radiographique 227
CHAPITRE IV : METHODES D'ESTIMATION DE L'AGE OSSEUX 231
IV.1. Introduction 232
IV.2. Les méthodes utilisant la radiographie du poignet et de la main gauches 237
IV.2.1. Méthode de Greulich et Pyle 239
IV.2.2. Méthode de Tanner-Whitehouse 249
IV.2.3. Méthode de Sempé 257
IV.2.4. Autres méthodes utilisant la radiographie du poignet et de la main Gauches 272
IV.3. Les méthodes basées sur la radiographie des autres segments du squelette appendiculaire 273
IV.3.1. Les méthodes basées sur la maturation de la clavicule 273
IV.3.2. Les méthodes basées sur la maturation du coude 275
IV.3.3. La méthode basée sur la maturation de la crête iliaque 277
IV.3.4. La méthode basée sur la maturation du genou 278
IV.3.5. La méthode basée sur la maturation des épiphyses distales (avant-bras, jambe) 278
IV.3.6. La méthode de Garn 278
IV.3.7. La méthode de Lefebvre et Koifman 278
IV.3.8. La méthode de Faruch Bilfeld et coll. 279
IV.3.9. La méthode basée sur la maturation de l'os sésamoïde du pouce 279
IV.4. Des commentaires sur les méthodes d'estimation de l'âge osseux 280
1. Le premier commentaire : une maturation « influencée » 280
2. Le deuxième commentaire : des critères face à une « frontière » 281
3. Le troisième commentaire : une applicabilité à « retester » 282
4. Le quatrième commentaire : des âges « critiques » 283
5. Le cinquième commentaire : des conditions d'examen « agressives » 283
6. Le dernier commentaire : un asynchronisme coté « numériquement » 283
IV.5. CONCLUSION : Quelle (s) méthode (s) utiliser pour l'estimation de la maturation squelettique ? 285
1. Quelle (s) est (sont) la (les) méthode (s) d'estimation d'âge osseux la (les) plus pertinente (s) pour une fin médico-légale ? 329

2. Quelle (s) est (sont) la (les) méthode (s) d'estimation de la maturation squelettique la (les) plus pertinente (s) pour une fin médicale ? 292

PARTIE PRATIQUE

I- MATERIEL et METHODES 297
I.1. Volet Matériel 299
(1) La population d'étude 300
A. La détermination de la population cible : 300
a. Le parcours 300
b. Les caractéristiques de la population 303
c. Les critères d'inclusion 303
d. Les critères de non inclusion 304
B. La fiche de renseignements : 305
a. La première partie : Les informations personnelles 306
b. La deuxième partie : Le questionnaire 308
C. La population : en chiffres et en pourcentages 308
a. La répartition par sexe 313
b. La répartition par tranches d'âge (civil) et par sexe 314
c. La répartition par commune 315
d. La répartition par année de recrutement (date du cliché radiographique) 315
(2) Les clichés radiographiques 316
A. L'appareillage et le protocole d'imagerie : 316
a. Dans la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse » 316
b. Dans la Clinique Al-Farabi 318
B. Les critères de qualité 318
C. Les clichés radiographiques de l'étude, en chiffres 320
D. L'anatomie radiologique du poignet et de la main 321
(3) Le logiciel Maturos® 4.0 324
A. Le choix de la méthode : 324
a. Pourquoi la méthode de Sempé ? 325
b. L'approche de la méthode de Sempé 329
B. Le logiciel Maturos® 4.0 CD Rom : 334
a. L'acquisition du logiciel 335
b. La présentation du « Pack » Logiciel Maturos® 4.0 CD Rom 337
C. Le mode d'utilisation du Logiciel Maturos® 4.0 : 338
a. Présentation du logiciel 338
b. Le calcul de l'âge osseux 339
D. Les âges osseux de la population d'étude, calculés par Maturos® 4.0 346
(4) Les mesures anthropométriques 352
A. La taille et le poids : 352
a. La fiche des renseignements, « Deuxième partie » 352
b. La taille 352
c. Le poids 355

B. L'Indice de Masse Corporelle (IMC) : ... 356
a. Le calcul ... 356
b. Le choix des courbes de corpulence pour enfants et adolescents ... 356
c. Le classement ... 358
C. Les mesures anthropométriques de la population d'étude : ... 359
a. La population d'étude et ses mesures anthropométriques ... 360
b. La répartition par rapport à l'indice de masse corporelle ... 365
(5) Le statut socio-économique ... 366
A. Les critères déterminant des SSE ... 366
B. La fiche des renseignements, « Deuxième partie » ... 367
C. Le classement ... 368
D. Le statut socio-économique de la population d'étude ... 368
(6) L'étude statistique ... 374
A. Le programme SPSS ... 374
B. Les opérations statistiques ... 376
(7) Le rangement et l'identification des dossiers ... 378
I.2. Volet Méthodes ... 381
(1) Le type de l'étude ... 382
(2) La présentation de la population ... 384
(3) L'applicabilité de la méthode de Sempé : ... 388
- La description de la relation : âge osseux (AO) / âge civil (AC) ... 388
- Le calcul de la variation inter-observateur et intra-observateur ... 388
- Le calcul du temps de lecture ... 389
(4) L'évolution de la maturation squelettique : ... 393
- Tracer le « schéma d'ossification » ... 393
- Rechercher les « critères osseux de la puberté » ... 394
- Editer un « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » ... 395
(5) Les corrélations de l'âge osseux : ... 397
- L'indice de masse corporelle (IMC) ... 397
- Le statut socio-économique (SSE) ... 398
II- RESULTATS ... 399
II. 1. La présentation de la population : ... 402
A. La répartition de l'échantillon, par sexe ... 402
B. La moyenne d'âge civil, par sexe ... 403
C. Les statistiques d'âge civil ... 404
D. La répartition de l'échantillon par tranches d'âge (civil), et par sexe ... 405
E. La répartition de l'échantillon par commune, et par sexe ... 407
F. La répartition de l'échantillon par date de recrutement, et par sexe ... 408
G. La répartition de l'échantillon par rapport à la source des clichés radiographiques, et par sexe ... 409
H. Le test de normalité de l'échantillon ... 410
II. 2. L'applicabilité de la méthode de Sempé : ... 412
A. La relation entre l'âge osseux et l'âge civil : ... 412
1. Le calcul de la normalité de l'âge osseux ... 412
2. Le calcul de la moyenne de l'âge osseux ... 414
3. Les statistiques de l'âge osseux ... 415

4. La comparaison des moyennes AC et AO 418
5. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC, par sexe 419
6. Le calcul de la corrélation entre AO et AC 422

B. La variabilité intra-observateur de la lecture de l'âge osseux : 425
1. Le calcul de la moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité intra-observateur (AOn1), par sexe 425
2. La comparaison des moyennes des âges osseux, anciens et nouveaux, de la variabilité intra-observateur 426
3. Le calcul de la moyenne de la différence entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur, par sexe 427
4. Le calcul de la corrélation entre AOn1 et AOa 427

C. La variabilité inter-observateur de la lecture de l'âge osseux : 429
1. Le calcul de la moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur (AOn2), par sexe 429
2. La comparaison des moyennes des âges osseux, anciens et nouveaux, de la variabilité inter-observateur 430
3. Le calcul de la moyenne de la différence entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe ... 430
4. Le calcul de la corrélation entre AOn2 et AOa 431

D. La durée de la lecture Maturos des clichés radiographiques : 432
Le calcul de la durée moyenne de la lecture Maturos des clichés radiographiques 432

(1) L'évolution de la maturation squelettique : 434

A. Le schéma de l'évolution de la maturation squelettique : 434
1. Comment tracer un « schéma d'ossification » ? 434
2. L'évolution de la maturation squelettique, en général 439
3. L'évolution de la maturation squelettique, par indicateur 442
4. L'évolution de la maturation squelettique, par groupe d'indicateurs 451
5. Les tendances de l'évolution de la maturation squelettique 452

B. Les critères osseux radiologiques de la puberté : 454
1. L'os pisiforme 454
2. L'os sésamoïde 458
3. L'hamulus de l'os hamatum 459

C. L'Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique 461

(2) Les corrélations de l'âge osseux 464

A. La corrélation de l'âge osseux avec l'indice de masse corporelle : 464
1. Le calcul de la moyenne de l'IMC par sexe 464
2. Les statistiques des IMC 465
3. La répartition de la population par rapport aux catégories de l'IMC, par sexe 467
4. Le calcul de la moyenne de l'IMC par catégorie IMC 469
5. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC par catégorie IMC 470
6. Le calcul de la corrélation entre la moyenne AO-AC et les catégories IMC 471

B. La corrélation de l'âge osseux avec le statut socio-économique : 473
1. La répartition de la population par rapport aux GSE, par sexe 473
2. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC par GSE 475
3. Le calcul de la corrélation entre la moyenne AO-AC et les groupes SSE 476
C. La relation entre l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique 478
Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique 481
III- DISCUSSION 552
(1) La population d'étude, en général 555
a. Les garçons et les filles dans l'échantillon 555
b. La moyenne des âges de l'échantillon 555
c. Le bas âge et le plus âgé dans l'échantillon 555
d. Les tranches d'âge de l'échantillon 555
e. La répartition communale de l'échantillon 556
f. Le recrutement des enfants et des adolescents 556
g. L'origine de la prise des clichés radiographiques 556
h. La normalité « statistique » de l'échantillon 557
i. Le niveau socio-économique des familles des enfants et des adolescents 557
(2) L'applicabilité de la méthode de Sempé 558
A. La détermination de l'âge osseux par la méthode de Sempé 559
B. La relation entre l'âge osseux et l'âge civil 560
C. La variabilité intra-observateur de la lecture de l'âge osseux 564
D. La variabilité inter-observateur de la lecture de l'âge osseux 565
E. Le temps de lecture Maturos des clichés radiographiques 567
F. Le Maturos en pratique : des qualités, mais des défauts inhérents au logiciel et non à la méthode 569
(3) L'évolution de la maturation squelettique 570
A. Le schéma de l'évolution de la maturation squelettique ou « schéma d'ossification » : 570
1. Concernant les dates d'évolution de la maturation squelettique 570
2. Le taux de maturation 574
B. Les critères osseux radiologiques de la puberté 577
C. L' « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » 579
(4) Les corrélations de l'âge osseux 582
A. L'indice de masse corporelle et sa corrélation avec l'âge osseux 582
B. Le statut socio-économique et sa corrélation avec l'âge osseux 585
C. La corrélation entre l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique 588

CONCLUSION 590
Bibliographie
Annexes
Résumés

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : La vitesse de croissance chez la fille et le garçon 12
Figure 2 : La vitesse de croissance globale (1) et les vitesses de croissance Associées 13
Figure 3 : Les radiographies de la même personne, à sa naissance et à 17 ans 15
Figure 4 : Vitesse de la croissance chez l'Homme 19
Figure 5 : Le calendrier pubertaire, garçon et fille 23
Figures 6 et 7 : Les courbes staturales et pondérales, pour garçons et filles, selon Sempé 28
Figures 8 et 9 : Les courbes de corpulence, filles et garçons 30
Figures 10 et 11 : Les courbes de corpulence normale, avec couloirs d'insuffisance pondérale et d'excès pondéral (courbes OMS) 31
Figure 12 : Compas de Harpenden 31
Figure 12 bis : Le développement embryonnaire du membre thoracique 58
Figure 13 : La courbe de Frost 82
Figure 14 : La courbe de croissance d'une gymnaste 84
Figure 15 : L'évolution séculaire en Belgique 85
Figure 16 : La première radiographie (la main de madame Röntgen et sa bague), en 1895 99
Figures 17 et 18 : Deux radiographies de l'épaule 100
Figure 19 : Wilhelm Conrad Röntgen 101
Figure 20 : La formation de l'image analogique 101
Figure 21 : La formation de l'image numérique 102
Figure 22 : Le post traitement de l'image radiologique 103
Figure 23 : Aspect du fémur distal d'un enfant affecté d'une arthrite chronique juvénile 104
Figure 24 : Radiographies de Véronique de sa naissance à 17 ans 105
Figure 25 : Emplacement des indicateurs de maturation 107
Figure 26 : L'os capitatum : les trois étapes d'auxogénèse (Q, P, N), de morphogénèse (M, L, K) et d'arthrogénèse (R, Y, S, T), d'après Sempé 108
Figure 27 : Analyse des filles et des garçons selon Maturos : courbes de maturation squelettique 108
Figure 28 : Radiographie du poignet et de la main (face). De la gauche à la droite : 6 mois, 3 ans, 9 ans, 18 ans 109
Figure 29 : Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein 112
Figure 30 : Radiographie du coude (face). De la gauche à la droite : 3 ans, 4 ans, 5 ans, 7 ans 112
Figure 31 : Radiographie du coude (face et profil) : 11 ans 113
Figure 32 : Radiographie du coude (face et profil). De la gauche à la droite : 6 ans, 12 ans 113
Figure 33 : Classification de l'ossification de la crête iliaque d'après Risser 114
Figure 34 : Radiographie du genou (profil). De la gauche à la droite : 11 mois, 4 ans, 5 ans 115
Figure 35 : Radiographie de la cheville et du pied 117

Figure 36 : Radiographie du bassin et de la hanche (face). De la gauche à la droite : nouveau-né, 4 mois, 8 mois 118
Figure 37 : Radiographie du bassin et de la hanche (face). De la gauche à la droite : 4 ans, 10 ans 118
Figure 38 : Technique d'évaluation de l'épaisseur du cartilage de la tête fémorale en US, selon l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli 123
Figure 39 : Corrélation négative entre les mesures de l'épaisseur du cartilage de la tête fémorale de et l'âge chronologique, selon l'étude Castriota-Scanderbeg et De Micheli 123
Figures 40 et 41 : Résultats de l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli, chez les deux sexes 124
Figure 42 : Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule, mise au point par Schmeling (schémas) 127
Figure 43 : Classification de Schmeling adaptée au scanner 127
Figure 44 : L'effet de l'épaisseur de coupe sur l'évaluation du stade d'après Mühler et coll. 128
Figure 45 : Illustration des stades de la classification en 9 stades développée par Kellinghaus et al., sur la base de celle de Schmeling et al. 129
Figure 46 : L'aspect IRM d'une rupture spontanée d'un pont épiphysiodèse sous l'effet de la croissance restante 134
Figure 47 : Stade 1 en séquence coronale : absence de fusion du cartilage de croissance 135
Figure 48 : Stade 2 en séquence coronale : fusion partielle du cartilage de croissance 136
Figure 49 : Stade 3 en séquence coronale : fusion totale du cartilage de croissance 136
Figure 50 : Classification en 4 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. D'après Schmidt (2007) 139
Figure 51 : Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. D'après Hillewig (2013) 140
Figure 52 : Classification en 3 stades des épiphyses du genou. D'après Jopp (2010) 141
Figure 53 : Classification en 5 stades des épiphyses du genou. D'après Dedouit (2009) 142
Figure 54 : Confrontation entre les radiographies et les IRM de genoux obtenues chez des individus présentant en radiographie standard du genou de face, un aspect de fusion complète au versant fémoral, identique pour l'ensemble des individus 143
Figure 55 : IRM de la cheville et du pied, coupe sagittale (fille, 12 ans) 144
Figure 56 : Stade 1 de l'épiphyse distale du tibia. Aucune zone de fusion n'est visible 145
Figure 57 : Stade 1 de l'épiphyse du calcanéus 145
Figure 58 : Stade 2 de l'épiphyse distale du tibia 146
Figure 59 : Stade 2 de l'épiphyse du calcanéus 146
Figure 60 : Stade 3 de l'épiphyse distale du tibia 147
Figure 61 : Stade 3 de l'épiphyse du calcanéus 147
Figure 62 : Classification des stades de fusion de la physe radiale distale gauche en IRM, selon Dvorak et coll. 151

Figure 63 : Antenne IRM de poignet O-scan. Medical Expo 153
Figure 64 : Les 6 stades de fusion de la physe radiale distale gauche en IRM, selon Dvorak 154
Figure 65 : Aspect d'un pont d'épiphysiodèse paracentral fémoral distal et ses conséquences 156
Figure 66 : Radiographie du thorax. Adulte, Face 159
Figure 67 : Radiographie de la clavicule en croissance. Les cinq stades de maturation de l'extrémité sternale 160
Figure 68 : Radiographie de l'épaule gauche. Adulte, Face 161
Figure 69 : Radiographie de l'épaule en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 1 an, (b) et (c) enfant de 6 ans, (d) et (e) enfant de 12 ans, (f) et (g) enfant de 14 ans 163
Figure 70 : Radiographie du coude. Adulte, Face et Profil 164
Figure 71 : Radiographie du coude en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 7 mois, (b) enfant de 3 ans, (c) enfant de 6 ans, (d) enfant de 9 ans 165
Figure 72 : Radiographie du coude en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) et (b) enfant de 11 ans, (c) et (d) enfant de 14 ans 166
Figure 73 : Radiographie de l'avant-bras et du poignet. Adulte, Face et Profil 167
Figure 74 : Radiographie du poignet et de la main. Adulte, Face et Profil 168
Figure 75 : Radiographie du poignet et de la main en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 10 mois, (b) enfant de 2 ans, (c) enfant de 6 ans, (d) enfant de 9 ans, (e) enfant de 11 ans 169
Figure 76 : Radiographie du bassin et des hanches. Adulte, Face 170
Figure 77 : Radiographie de la hanche. Adulte, Face 171
Figure 78 : Radiographie du bassin et de la hanche en croissance, de Face. (a) fille de 4 mois, (b) fille de 9 mois, (c) fille de 6 ans, (d) fille de 11 ans 172
Figure 79 : Radiographie du bassin en croissance. 17 ans, Face 172
Figure 80 : Radiographie du genou. Adulte, Face 173
Figure 81 : Radiographie du genou. Adulte, Profil 174
Figure 82 : Radiographie du genou en croissance, Face et Profil. (a) fille de 2 ans, (b) et (c) fille de 5 ans, (d) et (e) fille de 12 ans 175
Figure 83 : Radiographie de la cheville. Adulte, Face et Profil 176
Figure 84 : Radiographie du pied. Adulte, Face et Profil 177
Figure 85 : Radiographie de la cheville en croissance, Face et Profil. (a) fille de 3 ans, (b) fille de 5 ans, (c) fille de 13 ans, (d) fille de 10 ans 178
Figure 86 : Radiographie du pied en croissance, Face et Profil. (a) fille de 11 mois, (b) fille de 3 ans, (c) fille de 6 ans, (d) fille de 12 ans 179
Figure 87 : Syndrome de Sotos, grande taille et atteinte neurologique chez un garçon de 14 ans 184
Figure 88 : Courbe de croissance résiduelle du fémur distal et du tibia proximal chez la fille et chez le garçon (d'après Green et Anderson) 189
Figure 89 : Modifications de l'humérus à la naissance et à 5, 10 et 15 ans 195
Figure 90 : Clavicule d'une femme de 19 ans, vue médiale 196
Figure 91 : Fusions épiphysaires 198
Figure 92 : Classification IRM de l'ossification/la fusion de l'épiphyse distale du radius 219

Figure 93 : Méthode de Greulich et Pyle. Main et poignet gauches de face. Âge osseux correspondant à l'âge réel chez deux patientes différentes. Comparaison des points épiphysaires des phalanges à l'atlas de référence 240
Figure 94 : La méthode GP est basée sur la comparaison au standard de l'atlas Greulich-Pyle 241
Figure 95 : Résultats de l'analyse des 28 radiographies « standards » filles de l'atlas de GP selon Maturos 4.0 CD : critique du choix du « standard » à 11 ans 244
Figure 96 : Fille « standard » 19 - Âge osseux à 11 ans 244
Figure 97 : Les épiphyses (en hachuré) utilisées pour l'estimation de l'âge osseux par la TW3 à partir de la main et du poignet 250
Figure 98 : Comparaison du radius de la radiographie avec les schémas et mini radio et attribution d'un score individuel (stades de B à E) et (stades de F à I) 252-253
Figure 99 : Percentiles de SMS pour les filles et les garçons selon TW2-US90 255
Figure 100 : Aspect à l'écran de la méthode TW2 numérisée 255
Figure 101 : L'os capitatum : les trois étapes d'auxogénèse (Q, P, N), de morphogénèse (M, L, K) et d'arthrogénèse (R, Y, S, T) d'après Sempé 262
Figure 102 : Radiographie de Nathalie à l'âge de 12 ans. Emplacement des indicateurs de Maturation 265
Figure 103 : Ossification du poignet et de la main gauches : emplacement des indicateurs de maturation retenus (n=22) 266
Figure 104 : Ecran Maturos 4.0 : analyse du capitatum. Schémas et images proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture 269
Figure 105 : Analyse des filles et des garçons de l'Atlas de Greulich et Pyle selon Maturos : il existe un sus-décalage de maturation chez les jeunes Américains dans les deux sexes 270
Figure 106 : Les stades « radiologiques » de maturation de l'extrémité sternale de la clavicule, selon Schmeling et coll. 274
Figure 107 : Aspect TDM des stades de maturation claviculaire, d'après Schulze et coll. 275
Figure 108 : Ossification des os du coude selon Sauvegrain et coll., les indicateurs et leurs cotes 276
Figure 109 : Etapes d'ossification de la crête iliaque 277

Figure 110 : L'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » et la Clinique « Al Farabi » 300
Figure 111 : Le plan de travail « proposé » au sein de la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse » 301
Figure 112 : La Salle de Consultation (Urgences Pédiatriques) 301
Figure 113 : La salle de Consultation en face de la Salle de Radiologie 302
Figure 114 : « Fiche de renseignements », remplie par chaque sujet recruté dans cette étude 305
Figure 115 : La première partie de la « Fiche de renseignements » 306
Figure 116 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements » 308
Figure 117 : La salle de Radiologie, Hôpital pédiatrique 317
Figure 118 : Imprimante des clichés radiographiques, Dry Pix 317

Figure 119 : L'appareillage de la radiographie numérique, type SIEMENS AXIOM Luminos dRF 318
Figure 120 : Fiche de « Critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face » 319
Figure 121 : main et poignet gauches, incidence face, PA 320
Figure 122 : La division, les os et les osselets de la main 321
Figure 122 bis : Les os et les osselets du poignet et de la main 322
Figure 123 : Les articulations de la main 322
Figure 124 : Radiographie du poignet et de la main d'un enfant (à gauche), d'un adolescent (au milieu) et d'un adulte (à droite) 323
Figure 125 : Le Professeur Michel SEMPE (1930-2020) 324
Figure 126 : Les localités du peuplement méditerranéen en 2010 328
Figure 127 : La réglette des indicateurs (de Sempé). En haut : Os Scaphoïde (indicateur n°6), en bas : 3ème phalange de Médius (indicateur n°21) 330-331
Figure 128 : Les 33 indicateurs osseux de maturation (osselets, sésamoïdes et épiphyses) sur un cliché radiographique du poignet et de la main gauches de face 332
Figure 129 : Schéma des 22 indicateurs de maturation concernés par la lecture de l'âge osseux, chez Sempé 333
Figure 130 : Radiographie sur les 22 indicateurs de maturation concernés par la lecture de l'âge osseux, chez Sempé 334
Figure 131 : Le site web du Groupe Français d'Auxologie 335
Figure 132 : Le Bon de Commande pour achat du Logiciel Maturos® CD Rom 336
Figure 133 : Le Logiciel Maturos® CD Rom acquis 336
Figure 134 : Le pack MATUROS (boitier, CD Rom, dépliant mode d'emploi, livret méthode de Sempé, six clichés radiographiques) 337
Figure 135 : Le lancement de Maturos 338
Figure 136 : Ecran Maturos 4.0 - La page d'accueil 339
Figure 137 : Ecran Maturos 4.0 - Quelques rubriques 339
Figure 138 : Ecran Maturos 4.0 - La saisie des informations 340
Figure 139 : Ecran Maturos 4.0 - analyse du capitatum (premier indicateur). Schémas et mini radios proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture 341
Figure 140 : Ecran Maturos 4.0 - analyse de l'épiphyse proximale de la 3ème phalange de l'auriculaire (dernier indicateur).Schémas et mini radios proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture 342
Figure 141 : Ecran Maturos 4.0 - Les résultats de l'analyse de la maturation squelettique 343
Figure 142 : Le compte rendu de maturation squelettique, n° 1, fourni par Maturos 344
Figure 143 : Le compte rendu de maturation squelettique, n° 2, fourni par Maturos 345
Figure 144 : Loupe « Deli » à double lentille 346
Figure 145 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements » 352
Figure 146 : toise déroulable murale 353
Figure 147 : Les Courbes Staturo-pondérales, filles, modélisés. D'après les données du Pr Sempé 354

Figure 148 : Les Courbes Staturo-pondérales, garçons, modélisés. D'après les données du Pr Sempé 355
Figure 149 : pèse-personne électronique 356
Figure 150 : Les Courbes de corpulence, filles, modélisés. D'après les données du Pr Sempé 357
Figure 151 : Les Courbes de corpulence, garçons, modélisés. D'après les données du Pr Sempé 358
Figure 152 : Le calculateur électronique de l'IMC, « IMC.fr » 359-360
Figure 153 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements », le SSE 367
Figure 154 : Le logiciel SPSS et sa version 374
Figure 155 : Capture sur la base des données de l'étude sur le logiciel SPSS 375
Figure 156 : Le logiciel Windows Office Excel 376
Figure 157 : Les 5 pièces contenues dans le Dossier de chaque enfant et adolescent de l'échantillon 379-380
Figure 158 : La répartition de l'échantillon, par sexe (Représentation graphique en circulaire) 402
Figure 159 : La moyenne d'âge civil, par sexe (Représentation graphique en barres) 403
Figure 160 : La médiane d'âge civil, par sexe (Présentation graphique en boîtes à moustaches) 404
Figure 161 : La répartition de l'échantillon, par tranches d'âge, et par sexe (Présentation graphique en pyramide) 406
Figure 162 : La répartition de l'échantillon, par commune (Présentation graphique en circulaire) 407
Figure 163 : La répartition de l'échantillon par date de recrutement (Présentation graphique en circulaire) 408
Figure 164 : La répartition de l'échantillon, par sources des clichés radiographiques par sexe (Représentation graphique en circulaire) 409
Figure 165 : Le test de normalité de l'échantillon (Représentation graphique en histogramme) 411
Figure 166 : Le test de normalité de l'échantillon (Représentation graphique en dispersion) 411
Figure 167 : Le test de normalité de l'âge osseux de l'échantillon (Représentation graphique en histogramme) 413
Figure 168 : Le test de normalité de l'âge osseux de l'échantillon (Représentation graphique en dispersion) 413
Figure 169 : La moyenne de l'âge osseux, par sexe (Représentation graphique en barres) 414
Figure 170 : Les statistiques globales de l'âge osseux (Représentation graphique en boîte à moustaches) 416
Figure 171 : Les statistiques de l'AO pour chaque tranche d'âge (Représentation graphique en boîtes à moustaches) 417
Figure 172 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge (Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points) 417
Figure 173 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge, chez les filles (Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points) 418

Figure 174 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge, chez les garçons (Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points) 418
Figure 175 : La fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'âge civil (Représentation graphique en courbe) 421
Figure 176 : La fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'âge civil et par sexe (Représentation graphique en courbe) 422
Figure 177 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC sans droite de régression (Représentation graphique en dispersion) 423
Figure 178 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC avec droite de régression (Représentation graphique en dispersion) 424
Figure 179 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC pour chaque sexe, avec droite de régression (Représentation graphique en dispersion) 424
Figure 180 : La moyenne des nouveaux âges osseux, par sexe de la variabilité intra-observateur (Représentation graphique en barres) 425
Figure 181 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur (Représentation graphique en dispersion) 428
Figure 182 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe (Représentation graphique en barres) 429
Figure 183 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur (Représentation graphique en dispersion) 432
Figure 184 : L'évolution du taux de maturation par semestre, chez les garçons et les filles (Présentation graphique en courbe) 443
Figure 185 : Les cinq « trajets multidirectionnels » de l'ordre d'apparition des points d'ossification du poignet et de la main 455
Figure 186 : La moyenne des IMC, par sexe (Représentation graphique en barres) 467
Figure 187 : La médiane des IMC (Représentation graphique en boîte à moustaches) 469
Figure 188 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC (Représentation graphique en circulaire) 470
Figure 189 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC, par sexe (Représentation graphique en barres) 470
Figure 190 : La moyenne de l'IMC par catégorie de l'IMC (Représentation graphique en barres) 471
Figure 191 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC (Représentation graphique en courbe) 472
Figure 192 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC, par sexe (Représentation graphique en courbe) 473
Figure 193 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe (Représentation graphique en circulaire) 476
Figure 194 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe (Représentation graphique en barres) 476
Figure 195 : La correspondance AO-AC et les groupes SE (Représentation graphique en courbe) 477
Figure 196 : La correspondance AO-AC et les groupes SE, par sexe (Représentation graphique en courbe) 478

Figure 197 : La répartition de l'échantillon, par catégories IMC et groupes SSE (Représentation graphique en barres) 480
Figure 198 : La correspondance des catégories IMC aux groupes SE, par effectifs (Représentation graphique en courbes) 481
Figure 199 : Le squelette de la main et du poignet montrant les 33 indicateurs osseux de maturation, sur un cliché radiographique et sur un schéma correspondant 485
Figure 200 : Cliché de O. Mohamed. Age osseux = 0 mois 486
Figure 201 : L'évolution du taux de maturation chez les garçons, pour Sempé (à gauche) et pour notre étude (à droite) 576
Figure 202 : L'évolution du taux de maturation chez les filles, pour Sempé (à gauche) et pour notre étude (à droite) 576

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : La classification classique des âges 18
Tableau 2 : Tableau récapitulatif référentiel montrant les dates d'apparition et de soudure des centres d'ossification des os du membre thoracique en postnatal 73
Tableau 3 : Les doses efficaces moyennes pour les différents examens radiographiques 98
Tableau 4 : Les principales méthodes d'évaluation radiologique de l'âge osseux 110
Tableau 5 : Les principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies 111
Tableau 6 : Les principales études publiées sur les âges de début de fusion et de fusion complète de l'épiphyse distale du tibia 116
Tableau 7 : Résultats de l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli 124
Tableau 8 : Les 9 stades développés par Kellinghaus et al. 129
Tableau 9 : Comparaison de la dose de rayonnement entre l'imagerie à faible dose et à dose standard 130
Tableau 10 : Les principaux résultats des études sur l'IRM de la maturation l'extrémité médiale de la clavicule 138
Tableau 11 : La classification de la fusion en fonction des moyennes d'âge (avec DS) dans différents pays 151
Tableau 12 : Classification des stades de fusion de la physe radiale distale gauche en IRM, selon Dvorak et coll. 152
Tableau 13 : Le nombre de participants à l'étude Dvorak, avec la moyenne d'âge par différents stades de fusion du cartilage de la physe radiale, selon Dvorak et coll. 152
Tableau 14 : Activité mesurée du Tc 99m pendant la croissance, d'après Guillet et coll. 157
Tableau 15 : Les étiologies des précocités sexuelles chez la fille 185
Tableau 16 : Principales étiologies des retards de croissance à début postnatal 187
Tableau 17 : Quelques critères osseux permettant d'estimer que le nouveau-né est à terme 195
Tableau 18 : Dates d'apparition des principaux points d'ossification après 14 ans chez l'enfant normal 196
Tableaux 19 et 20 : Apparition tardive de certains points d'ossification chez les sujets masculins et féminins 197
Tableau 21 : Fusion de l'extrémité médiale de la clavicule 197
Tableau 22 : Chronologie de fusion des épiphyses 199
Tableau 23 : Âges (années) de fusion des épiphyses aux diaphyses 199
Tableau 24 : Définition pratique des stades de fusion des épiphyses 200
Tableau 25 : Estimation de l'âge en fonction du stade de fusion de la clavicule 200
Tableau 26 : Estimation de l'âge en fonction du stade de fusion, débutante ou avancée 201-203
Tableau 27 : Pourcentage de sujets de l'échantillon présentant une fusion totale, sujets de sexe masculin uniquement 203
Tableau 28 : Fusion complète (stade 4) acquise chez 100 % des sujets de l'échantillon, sexe masculin uniquement 204

Tableau 29 : Epiphyses à fusion tardive, au-delà de 22 ans 205
Tableau 30 : Nombre de participants dans les différents groupes d'âge, et leurs pays 218
Tableau 31 : Critères de classification pour ossification/fusion de l'épiphyse distale du radius par IRM 219
Tableau 32 : Abaque spécifique des filles des Score de maturation squelettique (maturity score) et des âges osseux équivalents (bone age) 254
Tableau 33 : Âge chronologique et maturation claviculaire 274
Tableau 34 : Evaluation des pratiques des membres du « Study Group for Forensic Age Estimation » 288
Tableau 35 : Les éléments de la procédure globale d'évaluation selon le « Study Group for Forensic Age Estimation » 289
Tableau 36 : Les méthodes d'évaluation de l'âge osseux utilisées à des fins Médicales 295

Tableau 37 : Le « Calendrier postnatal doublé », c'était mon calendrier « personnel » de conversion entre Mois et Année 307
Tableau 38 : La population recrutée (1) - Les informations générales (D'après : Fiche de renseignements) 309
Tableau 39 : La répartition de l'échantillon par sexe 313
Tableau 40 : Les tranches d'âge de l'échantillon, par sexe 314
Tableau 41 : La répartition de l'échantillon par communes 315
Tableau 42 : La répartition de l'échantillon par années de recrutement 315
Tableau 43 : La répartition de l'échantillon par origines des clichés radiographiques 320
Tableau 44 : La population recrutée (2) - Le taux de maturation squelettique et l'âge osseux correspondant (D'après : Logiciel Maturos® 4.0) 346
Tableau 45 : La population recrutée (3) - Les mesures anthropométriques (D'après : Fiche de renseignements) 361
Tableau 46 : La répartition de l'échantillon par rapport aux catégories de l'IMC, par sexe 365
Tableau 47 : La population recrutée (4) - Le Statut Socio-Economique (D'après : Fiche de renseignements) 369
Tableau 48 : La répartition de l'échantillon par rapport aux groupes SE, par sexe 373
Tableau 48 bis : La table de la taille minimale d'un échantillon, pour un niveau de confiance de 95% 385
Tableau 49 : Les résultats de la re-lecture des clichés radiographiques (âges osseux et durées de lecture) dans le cadre de la recherche de la variabilité intra-observateur 389-390
Tableau 50 : Les résultats de la re-lecture des clichés radiographiques (âges osseux et durées de lecture) dans le cadre de la recherche de la variabilité inter-observateur 391
Tableau 51 : La répartition de l'échantillon, par sexe 402
Tableau 52 : La moyenne d'âge civil, par sexe 403

Tableau 53 : Les statistiques d'âge civil, par total et par sexe 404
Tableau 54 : La répartition de l'échantillon, par tranches d'âge, et par sexe 406
Tableau 55 : La répartition de l'échantillon, par commune et par sexe 407
Tableau 56 : La répartition de l'échantillon, par date de recrutement et par sexe 408
Tableau 57 : La répartition de l'échantillon par sources des clichés radiographiques, et par sexe 409
Tableau 58 : Le test de normalité de l'échantillon 410
Tableau 59 : Le test de normalité de l'âge osseux de l'échantillon 413
Tableau 60 : La moyenne de l'âge osseux, par sexe 414
Tableau 61 : Les statistiques globales de l'âge osseux 415
Tableau 62 : Les statistiques de l'AO pour chaque tranche d'âge 416
Tableau 63 : La comparaison des moyennes AC et AO 419
Tableau 64 : Le test t de Student, pour la comparaison des moyennes AC et AO 419
Tableau 65 : La moyenne totale de la différence AO-AC, par sexe 420
Tableau 66 : La moyenne de la différence AO-AC, par tranches d'âge 421
Tableau 67 : La corrélation de Pearson entre AO et AC 423
Tableau 68 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité intra-observateur, par sexe 425
Tableau 69 : La comparaison des moyennes des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur 426
Tableau 70 : Le test t de Student des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur 426
Tableau 71 : La moyenne de la différence AOn1 et AOa, par sexe 427
Tableau 72 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur 428
Tableau 73 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe 429
Tableau 74 : La comparaison des moyennes des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur 430
Tableau 75 : Le test t de Student des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur 430
Tableau 76 : La moyenne de la différence AOn2 et AOa, par sexe 431
Tableau 77 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur 431
Tableau 78 : Les statistiques concernant la durée moyenne de lecture Maturos, par sexe 433
Tableau 79 : Evolution de la maturation squelettique en âge osseux, chez les Filles (Selon l'ordre de lecture de la méthode de Sempé) 435-436
Tableau 80 : Evolution de la maturation squelettique en âge osseux, chez les Garçons (Selon l'ordre de lecture de la méthode de Sempé) 438-439
Tableau 81 : Evolution des critères osseux radiologiques de la puberté, chez les Filles 457
Tableau 82 : Evolution des critères osseux radiologiques de la puberté, chez les Garçons 457
Tableaux 83 et 84 : La fréquence de l'os pisiforme, par tranches d'âge et par âge civil, chez les filles 459

Tableaux 85 et 86 : La fréquence de l'os pisiforme, par tranches d'âge et par âge civil, chez les garçons 459
Tableaux 87 et 88 : La fréquence de l'os sésamoïde, par tranches d'âge et par âge civil, chez les filles 460
Tableaux 89 et 90 : La fréquence de l'os sésamoïde, par tranches d'âge et par âge civil, chez les garçons 461
Tableaux 91 et 92 : La fréquence de l'hamulus, par tranches d'âge et par âge civil, chez les filles 461
Tableaux 93 et 94 : La fréquence de l'hamulus, par tranches d'âge et par âge civil, chez les garçons 462
Tableau 95 : Le tableau récapitulatif sur les dates d'apparition des indicateurs osseux de la puberté, chez les deux sexes 462
Tableau 96 : Les clichés radiographiques choisis pour l'édition de l'Atlas anatomo-radiologique 464-465
Tableau 97 : La moyenne des IMC, par sexe 466
Tableau 98 : Les statistiques des IMC, globales et par sexes 468
Tableau 99 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC, par sexe 469
Tableau 100 : La moyenne de l'IMC par catégorie de l'IMC 471
Tableau 101 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC 472
Tableau 102 : La corrélation entre la moyenne AO-AC et les catégories de l'IMC 474
Tableau 103 : Le test ANOVA entre différence AO-AC et catégories IMC 474
Tableau 104 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe 475
Tableau 105 : La moyenne de la différence AO-AC, par GSE 477
Tableau 106 : La corrélation de Pearson entre la moyenne AO-AC et les GSE 479
Tableau 107 : Le test ANOVA entre la différence AO-AC et les GSE 479
Tableau 108 : La répartition de l'effectif entre l'IMC et le SSE 480
Tableau 109 : La corrélation de Spearman entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE 481
Tableau 110 : Le test Khi-deux entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE 482
Tableau 111 : L'indice de Cramer entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE 482
Tableau 112 : La comparaison des intervalles temporels de l'étude avec ceux de la méthode de Sempé, pour Filles 571
Tableau 113 : La comparaison des intervalles temporels de l'étude avec ceux de la méthode de Sempé, pour Garçons 572
Tableau 114 : La comparaison des intervalles temporels (par âge civil) d'apparition des trois critères osseux de puberté chez Sempé et dans l'étude, pour Filles et pour Garçons 578

LISTE DES ABREVIATIONS

- **AC** = Âge civil = âge chronologique
- **AO** = Âge osseux
- **AOa** = Ancien âge osseux dans le cadre des variabilités intra- et inter-observateur
- **AOn1** = Nouvel âge osseux dans le cadre de la variabilité intra-observateur
- **AOn2** = Nouvel âge osseux dans le cadre de la variabilité inter-observateur
- **AR** = Âge réel
- **Art.** = Article
- **AS** = Âge statural
- **BIP** = Diamètre bipariétal
- **CASAS** = Computer-assisted skeletal age score
- **cm** = Centimètre
- **dF** = Groupe socio-économique Défavorisé
- **DS** = Déviation standard
- **ET** = Écart-type
- **et al.** = et autres
- **et coll.** = et collaborateurs
- **F** = Groupe socio-économique Favorisé
- **FIFA** = Fédération Internationale de Football Association
- **Fig.** = Figure
- **GH** = Growth hormone ou Hormone de croissance
- **GP** = Greulich et Pyle
- **GSE** = Groupe socio-économique
- HCR = Agence des Nations Unies pour les réfugiés
- **IC** = Intervalle de confiance
- **IGF-1** = Insulin-like growth factor 1
- **IGF-2** = Insulin-like growth factor 2
- **IMC** = Indice de masse corporelle
- **IOTF** = International Obesity Task Force
- **IRM** = Imagerie par résonance magnétique
- **IU** = Intra-utérin (e)
- **Kg** = Kilogramme
- **mF** = Groupe socio-économique Moyennement Favorisé
- **MIE** = Mineur isolé étranger
- **MNA** = Mineur non accompagné
- **n** ou **N** = Nombre
- **OMS** = Organisation Mondiale de la Santé
- **OPT** ou **OPG** = Orthopantomogramme dentaire

- **RCIU** = Retard de croissance intra-utérin
- **SA** = Semaine d'aménorrhée
- **SPSS** = Statistical Package for the Social Sciences
- **SSE** = Statut socio-économique
- **Tab.** = Tableau
- **TDM** = Tomodensitométrie
- **TW** = Tanner et Whitehouse
- **UNICEF** = United Nations International Children's Emergency Fund (Fonds des Nations unies pour l'enfance)

INTRODUCTION

Introduction

…mais la « maturation » n'est pas assimilable au « développement » en soi, ni à la « croissance » en général ou aux « accroissements » spécifiques : c'est un concept que l'on peut isoler de par sa nature d'ordre strictement qualitatif, car il n'y a pas de retour en arrière.

Professeur Michel SEMPÉ
La pédiatrie au quotidien : Analyse de la maturation squelettique, 1987

Deux évènements majeurs ont donné à notre travail d'Anatomie clinique sur l' « âge osseux » une deuxième jeunesse dans le domaine de la recherche biomédicale.
Le premier, œuvre de la FIFA, consiste en l'obligation de fournir une preuve de l' « âge osseux » des footballeurs participants aux compétitions internationales des U17 sur une IRM du poignet de tous les joueurs, c'est là une conséquence d'un scandale commis par le Nigeria qui a présenté une équipe U17 dont l'âge civil ne correspondait pas à l'âge osseux objectivé par l'IRM.
Le deuxième, c'est le phénomène migratoire de grande ampleur en Europe qui amené les instances juridiques européennes à utiliser l' « âge osseux » des migrants comme l'examen principal pour évaluer l'âge de ces enfants qui sont le plus souvent des mineurs isolés.
La maturation osseuse est un processus biologique étroitement corrélé à la croissance, marquant le développement d'un enfant, et dont l'évaluation de son degré est appelée « âge osseux ». Celui-ci correspond à l'état de la maturation d'un individu en référence à celle de la majorité des individus de mêmes sexe et âge.
L'évaluation de la maturation squelettique est une corrélation entre l'âge chronologique (ou civil) et l'âge anatomo-radiologique, dit l'âge osseux. Elle apparaît particulièrement essentielle pour quelques disciplines, telles la pédiatrie, la chirurgie pédiatrique, l'orthodontie, la médecine du sport et la médecine légale.

L'évaluation de la maturation osseuse nécessite le recours à l'imagerie qui cible des critères d'évolution standards, appelés les indicateurs osseux, pour cela, diverses méthodes ont été proposées pour l'estimation de l'âge osseux, basées souvent sur sa corrélation avec l'âge civil de l'individu.

Parmi ces méthodes, celles qui utilisent la radiographie du poignet et de la main gauches, en la comparant à un atlas de référence, ou à des schémas explicatifs, ou en attribuant des cotations.

Bien que ces méthodes soient les plus pertinentes et les plus utilisées, elles n'échappent pas aux remarques et limites, ce qui peut rendre l'âge osseux qui en découle approximatif et critiquable. Ces remarques et limites sont dues souvent au manque d'études actualisées dédiées à la maturation squelettique et à ses méthodes d'évaluation.

Notre travail tentera à :

(1) vérifier la correspondance de l'âge osseux des enfants et des adolescents de notre échantillon avec les données et les standards de la méthode de Sempé,
(2) rechercher les corrélations de la maturation squelettique avec deux facteurs extrinsèques influençant,
(3) suivre l'évolution de la maturation squelettique de la région de la main en général et particulièrement de chaque indicateur osseux à part,
(4) valider les résultats obtenus en comparant notre série aux séries des études qui ont traité la maturation squelettique,
(5) proposer un « Atlas anatomo-radiologique préliminaire et commenté » en suivant les stades évolutifs de la maturation squelettique de notre population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens.

La problématique et Les objectifs

L'évaluation de la maturation squelettique est un sujet « centenaire », puisque le premier « Atlas », celui de Todd, est daté des années 30 du 20ème siècle, mais ce sujet est toujours d'actualité. En effet, la question sur la maturation squelettique et son évaluation s'est développée depuis Todd (1937), Greulich et Pyle (1950), Lefebvre et Koifman (1956), Acheson (1957), Risser (1958), Tanner et Whitehouse (1962), Sauvegrain et Nahum (1962), Björk (1972), Sempé et Pavia (1979), Schmidt (2008), Faruch Bilfeld (2008), etc… jusqu'aux nos jours où un très bon nombre d'auteurs, ont travaillé sur le sujet.

Toutes ces contributions scientifiques ont donné au thème de « maturation squelettique » une richesse extraordinaire en matière de réflexions, d'idées, de procédés, d'outils, de critiques et de domaines d'application.

Certes, il n'y a pas une méthode d'évaluation de la maturation osseuse « parfaite », sans limites et sans critiques, pour mille et une raisons étalées avec détails dans quelques chapitres de la **Partie Théorique**, cependant, quand on est confronté à évaluer la maturation squelettique d'un enfant ou d'un adolescent, malade ou sain, ou à mener une étude sur cette maturation… on serait obligé à choisir parmi les méthodes les plus « adéquates », « rationnelles » et « éprouvées ».

Afin d'aborder la **problématique**, il nous a paru important de passer par **deux niveaux de questions**, **préliminaires** puis **précurseurs**, ce qui va nous conduire droit aux **objectifs** considérés comme la « boussole » pour cette étude.

Les questions préliminaires

Les questions préliminaires sont des questions introductives, ordinaires et simples, qui fondent l'armature de l'étude et préparent le lecteur à la compréhension de ses principes généraux.

Elles émergent de l'intitulé même de notre étude : « *étude anatomo-radiologique de la maturation squelettique de l'enfant et de l'adolescent dans la wilaya d'Annaba : intérêt dans l'estimation de l'âge osseux dans un but médical et médico-légal* ».

Ces questions, au nombre de cinq, sont arrangées comme suit :

(1) C'est quoi ?

Notre étude est celle de la maturation osseuse, appelée également squelettique, qui est un processus biologique étroitement corrélé à la croissance, marquant le développement d'un enfant ou d'un adolescent. L'étude accompagne cette maturation depuis son début, par l'apparition de plusieurs noyaux d'ossification secondaire dans les épiphyses et les os courts, jusqu'à sa terminaison, par l'acquisition de la forme et du volume finaux et la

fermeture du cartilage de croissance, c.-à-d. la fusion épiphyso-diaphysaire, d'un certain nombre d'indicateurs osseux.

(2) Pourquoi ?

Notre étude sur la maturation squelettique apparaît essentielle, pour toute évaluation du développement général de l'enfant et de l'adolescent, qu'il soit normal ou pathologique, non seulement en pédiatrie et en chirurgie pédiatrique, mais aussi à la recherche de l'âge « osseux », dans le cadre d'une enquête médico-légale, d'un enfant ou d'un adolescent décédé ou vivant. Par ailleurs, en médecine du sport, cette étude va ramener aux entraineurs et décideurs des domaines sportifs l'état biologique exact de la charpente osseuse et du cartilage de conjugaison, élément « scientifique » indispensable pour tout entraînement et classement.

(3) Sur qui ?

Notre étude sur la maturation squelettique cible une catégorie sociale en plein croissance, les enfants et les adolescents, des deux sexes, qui sont âgés de 6 mois jusqu'à 16 ans et qui demeurent à la wilaya d'Annaba. En fait, pour notre échantillon, cette catégorie et cette tranche d'âge, sont les plus adéquates pour n'importe quelle étude sur la maturation osseuse : la maturation est un phénomène actif, toujours en mouvement, mais limité dans le temps, il débute après la naissance et se termine à la maturité, à l'âge adulte, vers dix-huit ans pour les filles et vingt ans pour les garçons.

(4) Par quoi ?

Notre étude est anatomo-radiologique, elle va évaluer la maturation squelettique par le recours à l'imagerie médicale, plus précisément à la radiologie standard, qui cible des critères d'évolution standards appelés indicateurs osseux.

L'examen radiographique va intéresser une partie limitée du corps qui permet une appréciation suffisante de l'état du reste du squelette, c'est la région du poignet et de la main, du côté gauche par convention. En effet, l'état de la main et du poignet est la référence habituelle, puisque « les conclusions de l'étude de plusieurs centres d'ossification 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 » [127] ; et aussi, pour que « le risque lié à l'irradiation X soit des plus minimes étant donné la situation du membre thoracique aisément isolable » [133].

(5) Comment ?

Pour évaluer la maturation squelettique chez les enfants et les adolescents de notre échantillon, il est nécessaire d'adopter une « méthode d'évaluation de la maturation squelettique » parmi diverses méthodes connues dans la littérature. Les plus pertinentes et les plus utilisées, sont celles basées sur la radiographie du poignet et de la main gauches, en comparant la radiographie du sujet à un

Atlas de référence, et en évaluant le degré de la maturation pour donner un âge au sujet dit « osseux », celui-ci correspond à l'état de la maturation d'un individu en référence à celle de la majorité des individus de mêmes sexe et âge.

Le choix de la méthode n'est pas facile, mais quand on se base sur des critères précis on peut trancher et argumenter le choix. Et sur l'ensemble des méthodes qui s'intéressent à la maturation squelettique, figure la méthode « française » du Professeur Michel SEMPE comme étant le choix sans concurrent adopté par notre étude, pour l'estimation de l'âge osseux.

Bien évidemment, ce choix est basé sur plusieurs critères et cette adoption relève de plusieurs arguments, qui seront détaillés dans le chapitre « Matériel et Méthodes ». Néanmoins, on peut citer rapidement, quatre grandes raisons que nous allons revoir en détail, plus tard :

a. parce que la méthode de Sempé est considérée récente et a été mise à jour plusieurs fois par le fondateur lui-même ;
b. cette méthode a été testée et vérifiée sur le même échantillon pendant vingt et un ans (1953-1974), la durée de « l'étude auxologique française qui a permis de suivre séquentiellement la croissance, le développement et la maturation d'infants, d'enfants et d'adolescents depuis leur naissance jusqu'aux approches de leur maturité, soit dix-neuf années durant pour certains » [140] ;
c. l'échantillon de la méthode de Sempé appartient au bassin méditerranéen auquel l'Algérie en général et la région d'Annaba particulièrement appartiennent ; les pays et les populations de cette région géographique ont en commun plusieurs facteurs (climat, paysage, nourriture, relations, tourisme, etc…) ;
d. enfin, cette méthode par l'outil informatique « Maturos 4.0 », est devenue plus pratique dans son utilisation, plus facile dans sa manipulation et plus rapide dans ses résultats.

Les questions précurseurs :

Les questions précurseurs sont des réflexions « préalables », spécifiques, profondes, qui plongent dans les détails du sujet et amorcent la construction des objectifs.

Elles ciblent le vif du sujet, en évoquant sa « problématique » au premier lieu, pour proposer l'approche adéquate en deuxième lieu, afin de tracer les objectifs du travail.

(1) La problématique, en général

Bien que le thème de cette étude soit important vu ses retombées dans le domaine du quotidien médical et médico-légal, nous constatons un manque d'études sur ce sujet aussi bien en Algérie ou dans les pays maghrébins, arabes, africains, etc… ce qui amène les praticiens à se référer aux atlas occidentaux pour évaluer l'âge osseux de leurs sujets. En effet, « la détermination de l'âge

osseux doit être extrêmement prudente car la radiographie du patient n'est jamais comparée à sa population de référence » [87].

Par ailleurs, les données de la maturation squelettique des méthodes connues et dites « de référence » sont datées des années 30 du 20ème siècle, sans actualisation qui corrige les erreurs et développe les connaissances, ce qui peut rendre l'âge osseux qui en découle approximatif et critiquable, parce que et tout simplement, il y a un manque d'études actualisées des atlas et des tables envisagées à l'estimation de l'âge osseux. C'est pour cette raison qu' « il est particulièrement inquiétant… de voir pratiquer des examens dont la signification et la validité, par rapport à l'objet même de la demande d'expertise, n'ont pas été évalués depuis plus de 50 ans ! » [53].

Et avec ce qui a été dit, il ne faut pas ni omettre, ni négliger, plusieurs facteurs qui, depuis l'apparition des premiers Atlas jusqu'aux années actuelles, ont influencé la maturation et la croissance des populations des enfants à travers le monde entier, tels les facteurs socio-économiques, la nutrition, l'immigration, les maladies, l'évolution séculaire et bien d'autres…

Toutes ces constatations sus-citées, résument la problématique de notre étude pratique et nous poussent à trouver des approches de solutions.

(2) L'approche proposée :

Alors, logiquement mais théoriquement, la solution réside dans l'approche suivante : « faire une étude d'évaluation de la maturation squelettique, sur une population algérienne contemporaine d'enfants et d'adolescents des deux sexes »

Mais cette approche « rapide » manque de « clarté » et d'un peu de « réalisme », d'où l'importance d'avancer des « questions pratiques » qui doivent être posées par la logique des choses, et qui sont comme suit :

a. Quelle est la méthode d'évaluation de la maturation squelettique à adopter pour concourir à cette approche ? ;
b. La méthode de Sempé, ainsi adoptée, est-elle adaptée à notre échantillon, et par conséquent à la population algérienne contemporaine ?, autrement dit : est-ce que l'âge osseux des sujets de l'échantillon, déterminé par cette méthode, est en corrélation positive avec leur âge civil (test de fiabilité) ? ;
c. Est-ce que la méthode de Sempé peut être utile pour tracer le schéma de l'ossification des épiphyses et des osselets de la région du poignet et de la main des enfants et des adolescents de notre échantillon, en précisant les dates d'apparition et des fusions des indicateurs osseux ? ;
d. Est-ce qu'on peut se permettre, par conséquent, d'éditer un « Atlas » radiographique de la maturation squelettique à partir des clichés des enfants et des adolescents des deux sexes de notre échantillon où figurent

les stades d'évolutions de leurs « âges osseux » calculés par la méthode de Sempé ? ;

e. Est-ce que la méthode de Sempé peut être utile dans la détermination de la relation qui peut exister entre la maturation squelettique et les paramètres de la croissance staturo-pondérale de l'échantillon, tels la taille, le poids et l'indice de corpulence ? ;
f. Est-ce que la méthode de Sempé peut être utile dans la détermination de la relation qui peut exister entre la maturation squelettique et le statut socio-économique de l'échantillon ?

Toutes ces questions nous conduisent à un chemin « borné », avec « repères… descriptifs, comme le sont les panneaux de circulation » [140]. Ce sont les objectifs de cette étude.

Les trois objectifs de notre étude

L'évaluation de la maturation squelettique est une corrélation entre l'âge civil et l'âge anatomo-radiologique, connu sous le nom d'« âge osseux ».

Notre étude pratique est un travail de « correspondance » de l'âge osseux de nos enfants et adolescents avec les données de la méthode de Sempé : elle vise à appliquer la méthode d'estimation de l'âge osseux adoptée décrite par Sempé et coll. à notre population d'enfants et d'adolescents des deux sexes, à la recherche du taux de maturation squelettique et par conséquent la détermination de l'âge osseux.

Cette étude va tenter de répondre à un certain nombre de besoins scientifiques en concrétisant les **trois grands objectifs** évoqués maintenant et détaillés dans les lignes qui suivent :

1- Vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé adoptée par cette étude et appliquée sur une population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens ;
2- Suivre l'évolution de la maturation squelettique sur la région du poignet et de la main des enfants et des adolescents de notre échantillon, afin de tracer le schéma d'ossification des indicateurs osseux, de rechercher les « critères osseux radiologiques de la puberté » et d'éditer un « Atlas anatomo-radiologique préliminaire de la maturation squelettique » des enfants et des adolescents algériens, à partir des résultats recueillis dans notre série ;
3- Démontrer les liens de corrélation entre l'âge osseux d'une part et un certain nombre de paramètres d'autre part.

PARTIE

THÉORIQUE

LES PROLÉGOMÈNES :
*des **Notions*** et *des **Définitions***

« Les Prolégomènes sont une ample préface contenant les notions préliminaires nécessaires à l'intelligence d'un ouvrage : il s'agit ici de ce qui a trait à la dynamique de la croissance somatique,… à l'étude de la maturation squelettique en général. »

Professeur Michel SEMPÉ
Accroissements et Maturations Squelettiques du Coude, 2005

I- TERMINOLOGIE

II- STADES DU DEVELOPPEMENT HUMAIN

III- PARAMETRES DE LA CROISSANCE

IV- L'AGE ET SA DETERMINATION

V- L'EVALUATION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE ET L'ETHIQUE

I- TERMINOLOGIE

Trois termes qui se rapprochent dans leur substratum anatomophysiologique et son accroissement mais qui diffèrent dans leurs définitions et leurs moyens d'évaluation, ce sont : la « croissance », la « maturation » et le « développement ». Ces trois termes seront rassemblés sous le nom de l'« auxologie » qui est la science de la croissance, de la maturation et du développement somatiques de tout être humain [132], c'est la science de la dispersion somatique, de la variabilité des phénomènes, de leurs degrés de liberté [134].

La croissance, la maturation et le développement n'évoluent pas au hasard ; tout se passe comme si un but « génétique » était proposé au sujet, que ce soit pour sa taille, pour l'évolution de sa maturation ou pour l'harmonie de sa personne et de sa personnalité : un autre intérêt de déterminer au plus juste la variation évolutive est la « prédiction auxologique » [137].

1. La croissance :

Généralement, ce terme regroupe tous les événements conduisant un individu de la vie fœtale à un stade mature [87, 132] ; mais communément, ce terme signifie l'augmentation de taille [69].

La croissance est un phénomène actif, mesurable, cinétique, toujours en mouvement et qui, chez l'homme, procède par étapes ; cependant, ce phénomène est limité [132] : la croissance s'arrête à la maturité, ou à presque un tiers de la durée moyenne de vie [69].

La croissance obéit à des lois précises. Certaines sont parfaitement connues, d'autres sont encore mystérieuses et font l'objet de théories parfois contradictoires [87]. Par ailleurs, plusieurs facteurs intriqués influencent et régulent la croissance, non seulement les facteurs génétiques, endocriniens et nutritionnels, mais aussi les facteurs socio-économiques, mécaniques et environnementaux [27, 87]. Bien que ces facteurs soient encore mal connus [87], la croissance est très liée au développement des fonctions endocrines et notamment au développement sexuel [16].

Les données de la croissance sont quantifiables en termes d'agrandissement [127], puisque la croissance est le résultat de l'accroissement numérique des cellules par division cellulaire (hyperplasie), ou de l'augmentation de leur taille (hypertrophie), ou de l'augmentation quantitative de substance non vivante [69]. D'ailleurs, en pratique clinique, ce sont les accroissements qui seront les plus aisés à utiliser pour déterminer l'enchaînement des gains ou des acquis en matière de croissance [132].

a- <u>Les périodes de la croissance :</u>

La croissance normale ne se fait pas uniformément, mais pas non plus au hasard ; les divers changements apparaissent à des périodes prévisibles : les modifications qui surviennent dans l'ensemble du corps, dans ses parties et dans les différents organes et tissus ne sont pas simultanées et ne se déroulent pas à des vitesses équivalentes [69].

La croissance staturale normale se déroule en quatre phases, en fonction de la vitesse de croissance et de l'influence prépondérante d'un facteur de croissance donné [27, 87] :

- Croissance anténatale : c'est la croissance fœtale intra-utérine, basée sur les mensurations vertex-coccyx où la croissance en longueur est très graduelle depuis la fin de la quatrième semaine post-ovulatoire (= 5 mm), jusqu'au terme (= 310 à 350 mm) [69].
- Croissance de 0 à 5 ans : un bébé grandit de presque un tiers de sa taille de naissance au cours des six premiers mois, et d'environ la moitié à la fin de la première année, et à peu près doublée à quatre ans [69].
- Croissance de 5 à 10 ans ;
- Croissance après 10 ans : c'est la période du pic pubertaire. L'enfant prend 12 cm par an en période pubertaire [16], il reste en moyenne 35 cm à courir en taille. la croissance des membres est épuisée à 13 ans chez la fille et à 14 ans chez le garçon alors que la croissance du rachis et du thorax se continue durant plusieurs années encore jusqu'à la taille adulte [87].

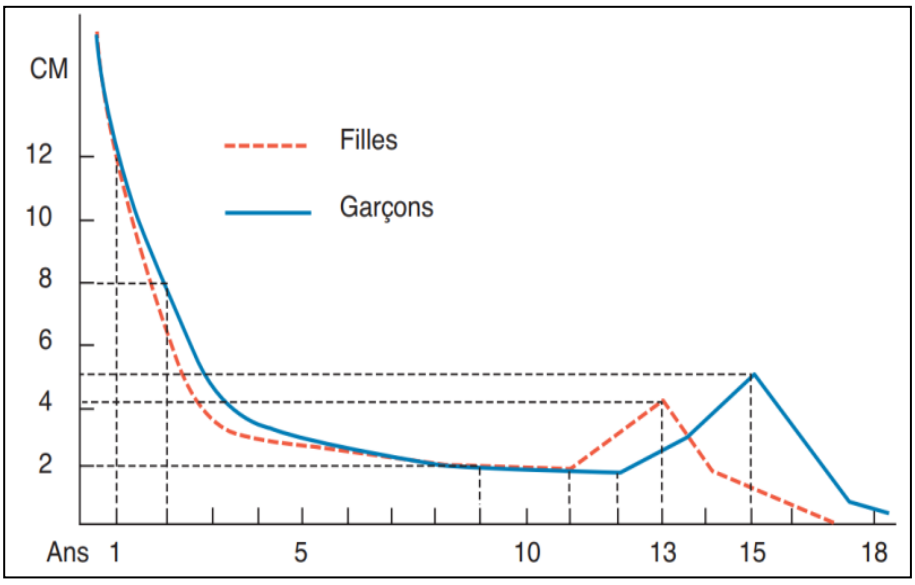


Figure 1 : La vitesse de croissance chez la fille et le garçon [87]

Dans la même optique, il est important de signaler qu'il existe trois pics de croissance (fig. 2) [55] :

- un premier pic en début de puberté intéresse les membres pelviens,
- un deuxième pic plus net porte sur le tronc,
- un troisième pic sur le thorax.

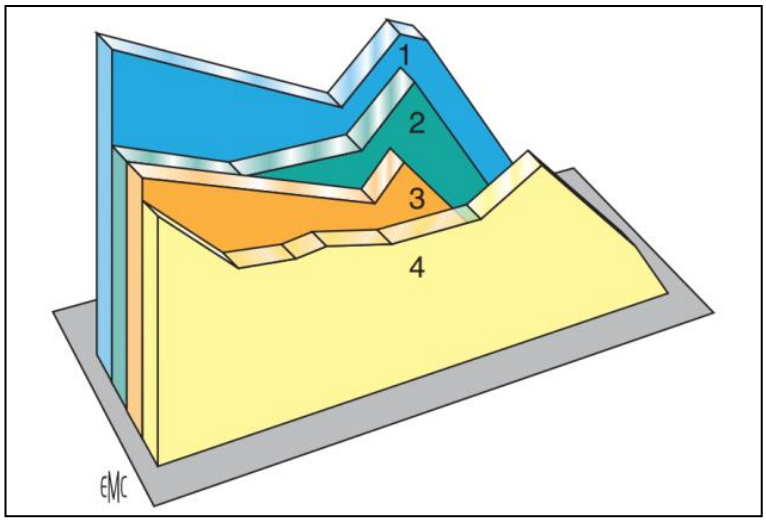


Figure 2 : La vitesse de croissance globale (1) et les vitesses de croissance associées : du tronc (2), des membres pelviens (3), et du périmètre thoracique (4) [87]

b- <u>Les aspects topographiques de la croissance :</u>

Il est évident que la croissance se fait avec un changement des proportions entre les différentes parties du corps. L'élément le plus évident est le développement majeur du tronc par rapport au segment céphalique [87]. De plus, la croissance squelettique ou osseuse qui est liée à l'allongement des os longs et à la croissance vertébrale [27], est à la fois le guide et le témoin principal d'une croissance harmonieuse [87].

- <u>La croissance des membres pelviens :</u>
  Elle est forte sur le cartilage de croissance fémoral distal et tibial proximal. Les membres pelviens cessent de grandir chez la fille au moment des règles soit à 13 ans et 6 mois d'âge osseux (AO), et chez le garçon à 15 ans et 6 mois. La croissance restante des membres pelviens est faible dès le début de la puberté [55].
- <u>La croissance rachidienne :</u>
  Elle est complexe, le potentiel de croissance est variable d'un étage à l'autre et diffère en arrière et en avant. La vitesse de croissance est non seulement différente à chaque étage du rachis mais elle n'est pas linéaire. II en est de même au niveau de chaque vertèbre où la croissance est distincte pour l'arc postérieur et pour le corps. Cette complexité rend difficile l'étude de la croissance rachidienne et aléatoire les prévisions de la croissance future [127].
- <u>La croissance cranio-faciale :</u>
  Elle semble encore plus complexe que la croissance rachidienne, la vitesse de croissance comporte des variations de rythme avec des périodes d'accélération, de ralentissement et des phases de croissance uniforme [127].

En résumé, la connaissance de la croissance en général est une donnée très ancienne en médecine et en pédiatrie : taille mesurée, courbe de croissance, calcul de l'AO, indice de maturation osseuse, tout ceci était déjà connu avant les années 1970. Mais aujourd'hui, grâce aux études longitudinales de ces quinze dernières années, la croissance a été particulièrement détaillée, segment par segment, os par os, permettant des prévisions précises. Le véritable progrès le plus récent consiste à pouvoir rapprocher tous les indicateurs de croissance, radiologiques et cliniques. Ces données sont spécifiquement pédiatriques et basées sur des statistiques reconnues et adoptées aujourd'hui par toutes les sociétés savantes [55].

2. La maturation :

La maturation est l'ensemble des changements, apparents ou découlant d'investigations variées, que présente une personne humaine tout au long cours de son enfance et de son adolescence, depuis sa conception jusqu'à l'âge adulte ou elle atteint sa maturité. Il peut s'agir de données d'évidence, telle l'apparition des caractères sexuels secondaires ou de résultats d'explorations soit cliniques (état dentaire), soit paracliniques, radiologiques (structures osseuses) ou biologiques (dosages hormonaux entre autres). Il est d'usage alors de n'analyser que la maturation dentaire, la maturation sexuelle et la maturation osseuse [139]. Ce sont les trois aspects de la maturation :

a. <u>La maturation osseuse :</u>

Encore appelée maturation squelettique, elle correspond à la transformation d'un tissu cartilagineux ou fibreux en tissu osseux [4, 23, 32, 69, 134]. En effet, il y a deux modèles d'ossification, soit un modèle d'ossification enchondrale par transformation des pièces cartilagineuses en structures osseuses qui se fait d'habitude au niveau des os longs, soit un modèle d'ossification membraneuse par transformation du tissu fibreux en os qui se fait d'habitude au niveau des os plats [4].

L'évaluation de la maturation osseuse est basée sur l'appréciation du degré de maturité du squelette en suivant l'apparition des centres d'ossification, les modifications de leur forme et de leur dimension [127]. La maturation squelettique est donc du ressort des seuls infants (petits enfants), enfants et adolescents qu'elle sert en quelque sorte à définir mieux l'âge chronologique (AC) [134], tout en restant un indicatif approximatif de cet âge [88]. Le véritable vécu de l'être humain en voie de croissance et d'épanouissement se mesurera donc à l'échelle de son ossification progressive, et le temps mis à s'accomplir au plus profond de son édification est probablement le temps vrai de la jeunesse [134].

L'évaluation de la maturation osseuse consiste à rechercher un pourcentage de la maturation totale et le situer entre des bornes définies au mieux pour encadrer la zone de normalité [127, 137], tout en se réservant la possibilité de renouveler ce jalon [137]. En fait, la variation même de la dispersion de tous les

sujets fait qu'il n'y a pas un témoin d'une maturation idéale mais deux limites, supérieure et inférieure [127].

L'apparition puis la fusion des différents points d'ossification suivent une séquence temporo-spatiale bien définie, de la naissance à la maturité [69], et lors de la fin de la croissance, les faits seraient simples : ossification terminée avec fusion des épiphyses aux diaphyses et disparition des physes [135].

L'examen radiologique des os, a permis d'étudier le développement squelettique et d'en chiffrer le degré, véritable paramètre de l'état biologique d'un enfant. En effet, le squelette va passer lentement d'un état cartilagineux radio-transparent à un état osseux radio-opaque. Lorsqu'on compare la radiographie du poignet à la naissance et à l'âge adulte (fig. 3), toutes les structures osseuses radio-opaques à l'âge adulte étaient en fait déjà présentes à la naissance, sous la forme de maquettes cartilagineuses immatures, radio-transparentes [23].



Figure 3 : Les radiographies de la même personne, à sa naissance et à 17 ans (main gauche) [23]

La maturation osseuse est légèrement différente selon le sexe [89], elle est plus lente chez le garçon que chez la fille [4], elle est très liée au développement des fonctions endocrines et notamment au développement sexuel [16, 89], et bien que le degré de maturation aille renseigner sur l'état d'avancement même de la puberté, sur le pronostic de taille de l'enfant [89], l'état du squelette ne correspond pas nécessairement à la taille, au poids ou à l'âge du sujet [69].

b. <u>La maturation dentaire :</u>

Les capacités informatives de l'orthopantomogramme dentaire, abrégé en OPG ou OPT, qui est la Radiographie panoramique dentaire, sont relativement précoces avec la définition possible d'un âge ou pourcentage « dentaire »

beaucoup plus précis que bien d'autres. Autrement, la seule information assez imprécise est l'éruption effective des dents de « six-sept » ans ou premières molaires adultes et de « douze-treize » ans ou deuxièmes molaires adultes [135].
Bien que l'ordre d'apparition des dents est assez constant, où il existe des atlas qui permettent de comparer un sujet donné à une table de référence [4], de nombreux travaux notamment en orthodontie, concernent l'évolution de la denture entre l'enfance et l'âge adulte, concluent que les critères dentaires dépendent de plusieurs facteurs [53, 54], tels :

- L'apparition des dents permanentes et des dents dites de sagesse (3ème molaires) [53, 54] qui apparaissent entre 17-25 ans pour les supérieures, et entre 16-20 ans pour les inférieures [131]. La présence des 4 dents de sagesse est en théorie synonyme de majorité de 18 ans ; mais ce critère est très fluctuant : de nombreux individus adultes n'ont jamais eu leurs 4 molaires de 12 ans et nombreux sont également ceux qui n'ont aucune ou 1 ou 2 dents de sagesse [53, 54].
- Les origines ethniques : la maturation dentaire des sujets d'origine maghrébine ou asiatique paraît plus précoce que celle des autres ethnies [53, 54].
- Le niveau socio-économique et l'état nutritionnel de l'individu [53, 54].

c. <u>Maturation sexuelle :</u>

L'apparition des caractères sexuels secondaires dépendent de l'activité hormonale de l'adolescent [53, 54].
La puberté est très variable selon les individus, elle apparaît à des âges différents selon le sexe et la race : entre 9 et 14 ans chez le garçon, et entre 8 et 13 ans chez la fillette [53, 54].
La méthode de cotation de Tanner permet par la seule inspection d'un adolescent de relever différents marqueurs (repères) morphologiques précis de l'évolution de la puberté (pilosité, développement des seins, des testicules…). Cependant, ces repères ne correspondent pas à des âges absolus. L'âge moyen de la population d'individus qui affichent tous le même stade pubertaire est une valeur scientifique objective pour la population donnée, mais l'écart-type (ET) qui lui est associé est de plusieurs mois [53, 54].
Si le relevé de ces critères ne nécessite qu'un simple examen visuel de la part du médecin, il n'en reste pas moins que c'est un examen souvent mal perçu par le jeune qui conçoit difficilement un examen quelque peu intrusif dans son intimité [53, 54].
Enfin, il est bien constaté que la maturation squelettique est corrélée avec les repères de la maturation sexuelle et ceci lui donnera tout son sens durant l'adolescence [139]. Les processus de maturation osseuse sont directement liés à ceux de l'appareil de reproduction qui sont responsables de la plupart des

changements extérieurs notables et sur lesquels on se fonde pour apprécier globalement la maturité du corps [69].

3. Le développement :

Le développement du squelette d'un enfant, un terme beaucoup trop général [139], est la résultante des deux processus précédents, la croissance staturale et la maturation osseuse [4, 23]. La croissance et la maturation sont très liées au développement des fonctions endocrines et notamment au développement sexuel [16]. En effet, pour atteindre sa taille adulte, cet enfant va devoir grandir et mûrir, et ce double processus, bien observé et surveillé sur une courbe de croissance staturo-pondérale et sur un cliché radiographique, peut être altéré dans le cas d'une avance ou d'un retard de développement. Dans la puberté précoce, certains enfants « mûrissent » plus vite avec un risque de petite taille définitive ; à l'inverse, dans les situations de retards pubertaires, un retard de maturation osseuse peut conduire à une croissance plus lente jusqu'à ce que l'adolescent atteigne une taille adulte finale très satisfaisante [23].

Et de ce fait, la radiographie utilisée dans l'évaluation de la maturation squelettique sera toujours couplée à un examen clinique permettant d'évaluer le développement staturo-pondéral et pubertaire de l'enfant et d'orienter ainsi l'évaluation de la maturation [23].

En résumé, l'organisme humain est en constante évolution physique qui résulte d'un double processus [16] :

- La « macrocroissance » : c'est la croissance somatique qui correspond à un processus quantitatif d'apposition et de multiplication cellulaire, objectivée par l'évolution de la taille globale et des autres segments (périmètres, diamètres), de la vitesse de croissance, du poids (épaisseur des plis cutanés) et du volume (développement musculaire) ;
- La « microcroissance » : c'est la maturation somatique qui correspond à un processus qualitatif de perfectionnement des structures et des fonctions ; la maturation osseuse, étant le meilleur indicateur de la maturation de l'organisme.

II- STADES DU DEVELOPPEMENT HUMAIN

Pour qu'un individu atteigne sa maturité, son développement normal doit passer par quatre grandes périodes qui sont des intervalles de temps et où n'existent pas de séparation nette entre deux intervalles adjacents. La durée de beaucoup de ces périodes varie avec l'hérédité, la race, le sexe et l'environnement [69].

Classiquement, la classification des périodes d'âge se résume en quatre. L'anthropologie médico-légale, distingue aussi quatre périodes à l'âge : l'âge fœtal, la période de la naissance à l'adolescence, le passage de l'adolescence à l'âge adulte, puis la dégénérescence progressive qui caractérise l'avancée progressive vers la sénescence [121].

Tableau 1 : La classification classique des âges.
L'auteur a ajouté les adultes très âgés, à partir et au-delà de 80 ans [121]

Embryon	Les 8 premières semaines de la vie intra-utérine
Fœtus	De la 9e semaine à la naissance
Période périnatale	Autour de la naissance
Période néonatale	Les 4 premières semaines après la naissance
Stade infantile précoce (infans I)	De 0 à 7 ans
Stade infantile tardif (infans II)	De 8 à 14 ans
Adolescence (juvenis)	De 15 à 20 ans
Adulte jeune	De 21 à 39 ans
Adulte mature	De 40 à 59 ans
Adulte âgé ou senior	De 60 à 79 ans
Adulte très âgé	≥ 80 ans
** la classe des sujets « très âgés », à partir et au-delà de 80 ans, a été ajoutée par Beauthier (2010), dans son étude sur l'évolution des sutures palatines et faciales*	

1- Période prénatale :

Appelée aussi, période anténatale, c'est la période de développement embryonnaire intra-utérin, elle est exponentielle jusqu'à la naissance [27, 87]. Elle est divisée en trois trimestres de longueur égale et s'étend sur environ dix mois lunaires, 280 jours à dater du commencement de la dernière période menstruelle, ou 266 jours après la date présumée d'ovulation [69].

La morphologie et la vitesse de croissance sont réglées par une combinaison complexe de facteurs génétiques et posturaux [27, 87], mais surtout par les apports nutritionnels du placenta, l'insuline et la somatomédine A (ou insulin-like growth factor 2 : IGF-2) [27].

Tandis que la croissance pondérale est la plus rapide pendant le dernier trimestre de la vie fœtale, la croissance du squelette est relativement lente jusqu'aux derniers mois, puis elle s'accélère rapidement [69] : 15 cm entre le 3ème et le 6ème mois anténatal [55], puis 50 cm en neuf mois [27]. Et pendant cette période, la maturation prénatale conduit à l'ossification surtout des maquettes cartilagineuses diaphysaires [4].

La période prénatale est subdivisée en deux sous-périodes, embryonnaire et fœtale [69].

2- Période d'enfance :

C'est la première période de la vie postnatale, elle s'étend de la naissance à la puberté [69]. Elle est couramment divisée, en pédiatrie, en 4 âges d'enfance [28, 70] :

- Néonatologie : c'est le nouveau-né, depuis sa naissance jusqu'à la chute du cordon, vers le 10ème jour postnatal, comme il peut répondre d'habitude au premier mois postnatal (J0-J28) ;
- Etat de nourrisson : va de la chute du cordon à l'âge de 2 ans ;
- Première (ou petite) enfance : va de 2 ans à 6 ans (âge de la scolarisation) ;
- Deuxième (ou grande) enfance : va de 6 ans à 12 ans ; elle précède l'adolescence.

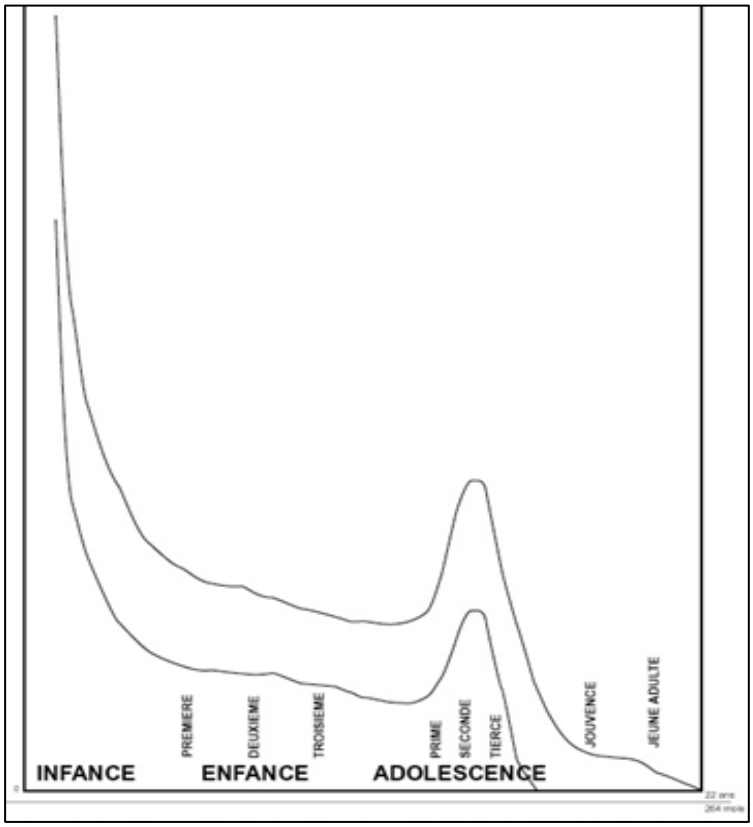


Figure 4 : Vitesse de la croissance chez l'Homme [132]

a- L'enfance et la croissance staturo-pondérale :

De façon générale, la période « infanto-enfantine » de la vie représente l'acquis d'environ 80% de la stature (ou taille) adulte aussi bien chez les filles que chez les garçons qui l'atteignent quelques deux années à leur suite [133].

Les particularités de la croissance pendant cette période diffèrent selon les âges d'enfance :

- La croissance avant et pendant la première enfance :

  Il s'agit d'une période de très grande croissance [70, 87]. Elle est rapide puis déclinante [27, 87] : la taille double durant cette période, passant de 54 cm à 108 cm [87]. Cependant, on observe une diminution progressive sous forme de ralentissement de la vitesse de croissance [28, 55, 87], c'est la décélération staturale [133] : 24 à 25 cm sont acquis durant la première année, 12 cm à la deuxième année, 8 cm à la troisième année et 6 cm la quatrième année [27, 87]. La vitesse de croissance se stabilise à partir de l'âge de 5 ans [87].

  Pendant cette période, l'effort de croissance porte surtout sur la prise de poids, et les acquisitions neuropsychiques [55]. Cette phase de croissance est marquée par la diminution de l'influence des facteurs intra-utérins au profit des facteurs génétiques, de la nutrition et des facteurs hormonaux (hormones thyroïdiennes, puis hormone de croissance) [27].

- La croissance pendant la deuxième enfance :

  La croissance devient linéaire, douce et plus lente [27, 28, 87], à vitesse constante [27, 89], d'environ 6 à 7 cm par an à la phase prépubertaire [89]. C'est la période au cours de laquelle la croissance se fait surtout aux membres : deux tiers pour les membres et un tiers pour le tronc [87]. Elle est sous l'influence importante de la génétique, de l'axe somatotrope et des hormones thyroïdiennes [27].

b- L'enfance et la maturation squelettique :

A la naissance, les points épiphysaires visibles sont [4] :

- les points fémoraux inférieurs : développés à 36 semaines d'aménorrhée (SA) ;
- les points tibiaux supérieurs : développés à 38 SA ;
- les points huméraux supérieurs : de façon inconstante, développés à 41-42 SA ;
- les os ronds visibles à la naissance sont au niveau du tarse : le calcanéus (développé à 24 SA), le talus (développé à 28 SA) et le cuboïde.

Chez le nouveau-né, aucun os carpien n'est visible [4] ; puis, pendant la période d'enfance, la maturation postnatale va conduire à l'ossification de la plupart des épiphyses des os longs des membres, les os du carpe et du tarse, et les sésamoïdes [4, 69]. Tous ces centres d'ossification apparaissent un à deux ans plus tôt chez les filles que chez les garçons [69].

Les épiphyses qui s'ossifient en premier dans un élément squelettique sont les dernières à se souder aux diaphyses, elles se trouvent aux extrémités dites « fertiles » : épaule, poignet et genou [69].

3- Période d'adolescence :

C'est la deuxième période de la vie postnatale [69], période de transition entre l'enfance et l'âge adulte [27], elle s'étend alors de la puberté jusqu'à la maturité (âge adulte) [69, 70].

L'adolescence est la période de croissance humaine située entre 10 et 19 ans selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), caractérisée par un rythme important de

croissance et de changements [98] : elle correspond à la maturation de la fonction hypothalamo-hypophyso-gonadique, qui aboutit au développement complet des caractères sexuels secondaires [27, 53, 54], à l'acquisition de la taille définitive, de la fonction de reproduction, et de la fertilité. L'adolescence s'associe également à des modifications psychologiques et affectives profondes [27].

a- Les stades de l'adolescence :

L'adolescence n'a pas de limites très tranchées ni pour s'instaurer, ni pour se clore tout au moins en utilisant des radiographies objectives en elles-mêmes, subjectives quant à leur interprétation qui ménagera une assez large zone d'appréciation et raisonnera en pourcentage et non en un « âge » toujours fallacieux [135]. Néanmoins, on peut distinguer à l'adolescence trois stades, la prime, la seconde et la tierce adolescence, centrés par le « pic » d'adolescence (fig. 4) [133].

b- Le déroulement de la puberté :

Le début de la puberté est très variable selon les individus, elle apparaît à des âges différents selon le sexe et la race [53, 54], d'habitude : entre 8-13 ans chez la fille, et 9-16 ans chez le garçon [4, 16, 27, 28, 53, 54, 69, 131] ; elle débute chez les filles avec deux ans d'écart avant les garçons [34, 55, 69, 133].

Le processus de puberté va durer environ 6 ans et va s'achever vers 16 ans en moyenne chez la fille et vers 18 ans chez les garçons [34].

Le déclenchement de la puberté résulte de la réactivation de la fonction gonadotrope après la période de quiescence de cette fonction tout au long de l'enfance : la sécrétion pulsatile de LH-RH (luteinizing hormone-releasing hormone), appelé également GnRH (gonadotrophin-releasing hormone), va entraîner une sécrétion accrue et pulsatile de LH (luteinizing hormone) et FSH (follicle stimulating hormone), aboutissant à une augmentation de la production de stéroïdes gonadiques appelée « gonadarche », la testostérone chez le garçon et l'estradiol chez la fille. Les surrénales participent au développement de la pilosité sexuelle : cela constitue « l'adrénarche » [27].

c- Les signes de la puberté :

La classification de Marshall et Tanner permet par la seule inspection d'un adolescent de relever différents marqueurs ou repères morphologiques précis de l'évolution de la puberté (pilosité, développement des seins, des testicules…) [53, 54]. Chez le garçon, comme chez la fille, le développement pubertaire passe par différents stades cotés de 1 (absence de développement pubertaire) à 5 (développement complet adulte) [27, 53, 54].

- <u>Chez la fille :</u>

  (1) Le développement des glandes mammaires, est la première manifestation pubertaire, débutant entre 8 et 13 ans (moyenne = à partir de 11 ans), et qui seront complet quatre ans plus tard [27, 87].

(2) La pilosité de la région pubienne, débute le plus souvent 6 à 12 mois après la glande mammaire, et prend un aspect d'adulte en deux à trois ans en triangle à base supérieure horizontale [27, 87].

(3) La pilosité axillaire, apparaît en moyenne 12 à 18 mois plus tard. Elle évolue en deux à trois ans [16, 27].

(4) La vulve s'horizontalise, avec hypertrophie des petites lèvres, accentuation des grandes lèvres, augmentation discrète du clitoris, et devient sécrétante (leucorrhées).

(5) Les premières règles (ménarche), apparaissent entre 10 et 16 ans (moyenne : 13 ans) [16, 27], entre 2 ans et 2 ans et demi (maximum, 4 ans) après l'apparition des premiers signes pubertaires. Les hémorragies ne sont pas cycliques d'emblée, le devenant au bout de 18 à 24 mois, quand les cycles sont devenus ovulatoires [27].

- <u>Chez le garçon :</u>

  (1) L'augmentation de volume testiculaire, est le premier signe de puberté, en moyenne vers l'âge de 11 à 13 ans. Ce signe témoigne du développement des tubes séminifères, induit par l'augmentation de la FSH. Le volume testiculaire devient supérieur ou égal à 4 ml, et la longueur testiculaire supérieure ou égale à 2,5 cm [27, 87].

  (2) La pilosité pubienne, apparaît entre 0 et 6 mois après le début du développement testiculaire, et évolue en deux à trois ans vers un aspect adulte, s'étendant à la racine de la cuisse et s'allongeant vers l'ombilic [27, 87].

  (3) L'augmentation de la verge, au-delà de 5 à 6 cm, elle débute vers l'âge de 13 ans, un an après l'augmentation de volume testiculaire [27, 87].

  (4) La pilosité axillaire, elle apparaît 12 à 18 mois après l'augmentation de volume testiculaire [27].

  (5) La pilosité faciale est plus tardive, de même que la pilosité corporelle, inconstante et variable, et que la modification de la voix [27].

  Le développement de la pilosité pubienne, axillaire, l'augmentation de taille de la verge et la mue (changement de la voix) sont liés à l'augmentation de la synthèse de testostérone par les cellules de Leydig sous l'influence de la LH et des hormones surrénaliennes [27].

  Chez 30 % des garçons, apparaît en milieu de puberté une discrète gynécomastie uni- ou plus souvent bilatérale, qui régresse en quelques mois dans la quasi-totalité des cas [27].

d- L'adolescence et la croissance staturo-pondérale :

La période d'adolescence est marquée par le « pic pubertaire », qui correspond à la reprise d'une croissance staturo-pondérale rapide et intense [27, 28, 69, 87], à une vitesse de croissance staturale largement dépendante des stéroïdes sexuels [27], et à un développement remarquable de l'appareil génital [28].

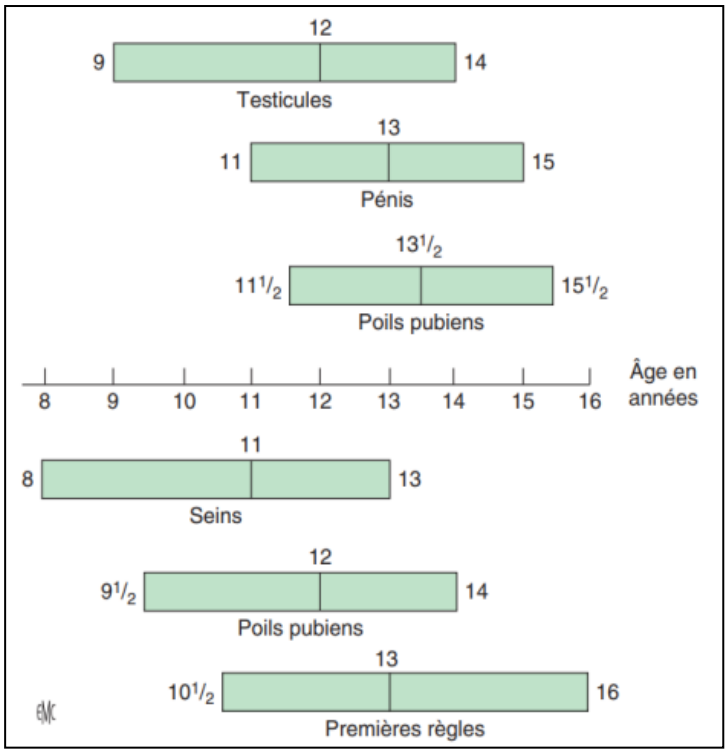


Figure 5 : Le calendrier pubertaire, garçon et fille [27]

La vitesse de croissance augmente brutalement jusqu'à 13 ans chez la fille et 15 ans chez le garçon. Elle s'effondre ensuite pour ne concerner que le rachis et va diminuer lentement [87].

Chez la fille, (1) l'accélération pubertaire est synchrone des premiers signes pubertaires, vers 10,5 ans. (2) La vitesse de croissance passe de 5 cm/an à un pic de 8 cm/an vers 12 ans. (3) La taille passe de 140 cm à 11 ans à 163,7 cm en moyenne vers l'âge de 18 ans. (4) La croissance pubertaire totale est de 20 à 25 cm [27].

Chez le garçon, (1) l'accélération pubertaire est retardée d'environ un an par rapport aux premiers signes pubertaires, vers 13 ans. (2) La vitesse de croissance passe de 5 cm/an à un pic de 10 cm/an vers l'âge de 14 ans. (3) La taille passe de 150 cm à 12 ans et demi à 177 cm en moyenne, vers l'âge de 18 ans. (4) La croissance pubertaire totale moyenne est de 25 à 30 cm [27].

Le gain statural pubertaire dépend en partie de l'âge de démarrage pubertaire : il est d'autant plus élevé que la puberté démarre tôt. Mais l'âge de démarrage de la puberté ne modifie pas de façon importante la taille finale, à condition que la puberté démarre dans les limites physiologiques [4, 27].

L'accélération de la vitesse de croissance s'accompagne d'une maturation du cartilage de croissance qui va progressivement se souder [4, 27]. La fin de la croissance (gain statural < 2 cm/an) survient lors de la disparition du cartilage de croissance et de la soudure épiphyso-métaphysaire, correspondant à un AO de 15 ans pour la fille, 16 ans pour le garçon [27].

Cette période concerne essentiellement le tronc (deux tiers pour le tronc, un tiers pour les membres) [87].

Parallèlement, le poids augmente, il double entre 10 et 15 ans, avec un décalage de quelques mois [55, 89].

e- L'adolescence et la maturation squelettique :

La puberté est une période charnière pour la maturation osseuse qui coïncide avec l'apparition de l'os sésamoïde du pouce est parfois considérée comme le marqueur du début de la puberté [16, 27, 34, 89], de même que l'apparition de l'os hamatum qui semble coïncider bien aussi avec le déclenchement de la puberté [89]. L'os sésamoïde peut avoir un rôle pour les âges charnières de 10 et de 13 ans à condition de ne pas être pris en compte de façon isolée mais en association avec l'analyse complète de l'ensemble des os de la région main-poignet voire en combinant d'autres méthodes comme l'analyse du coude par la méthode de Sauvegrain et Nahum afin d'obtenir un résultat le plus juste possible [34].

Pendant cette période d'adolescence, la plupart des centres secondaires d'ossification de la clavicule, de la scapula et de l'os coxal apparaissent. La fusion entre centres épiphysaires et diaphyses se fait pendant la deuxième et la troisième décennie ; ces fusions interviennent un à deux ans plus tôt chez la fille que chez le garçon. La disparition des lignes épiphysaires est soumise au contrôle hormonal [69].

4- Age adulte :

On considère que les filles atteignent la maturité à environ dix-huit ans, et les garçons à vingt ans [69].

Quelques critères squelettiques qui marquent le passage de l'adolescence à la maturité : (1) l'humérus dont son épiphyse distale est la première, parmi les os longs, à se souder et son épiphyse proximale la dernière, à 19 ans ou plus, et (2) la crête iliaque dont son point d'ossification se soude au début de la période adulte, de 21 à 23 ans [69].

III- PARAMETRES DE LA CROISSANCE

La croissance, sujet de préoccupation quotidien pour les pédiatres et les chirurgiens pédiatres, est facilement appréciée à partir de paramètres cliniques tels que la taille, le poids ou les segments du corps tels la longueur des membres et le périmètre crânien. Les courbes individuelles permettent, en fonction de l'âge chronologique (AC) de l'enfant, d'appréhender son développement [53, 54].

La vitesse de croissance d'un enfant à un moment donné ne correspond pas nécessairement à sa taille définitive. Cette constatation montre que les paramètres cliniques doivent être rapportés non pas à l'AC, mais à l'état de maturation squelettique qui semble étroitement corrélée avec la croissance [53, 54].

Ces paramètres cliniques sont des mesures anthropométriques utilisées pour évaluer la croissance chez les enfants et les adolescents et qui se font selon l'âge et le sexe. Ils comprennent [49] :

- Le poids ;
- La taille ;
- Les plis cutanés (tricipital et sous-scapulaire) ;
- Les périmètres (crânien et brachial) ;
- Le pourcentage de masse grasse brachiale ;

À partir de six ans, d'autres mesures ont été ajoutées aux précédentes [49] :

- Les périmètres de la taille et des hanches ;
- L'indice Skélique ;
- L'indice de Quételet.

1- Taille :

Aussi précise soit-elle l'étude de la taille globale d'un individu ne renseigne pas sur les particularités de la croissance de chaque segment [127], la taille n'est en effet qu'un repère partiel [134].

La croissance en longueur est un processus discontinu marqué par une alternance de stagnation et de sauts, de fréquence et de durée variables. Jusqu'à 2 ans, la croissance s'effectue par des poussées très courtes, de l'ordre de 24 heures, sur un fond de stagnation. Dans 70 % des cas, la croissance n'était pas linéaire, elle était caractérisée par des pics séparés par des périodes de vitesse décroissante, avec une périodicité de 30 à 55 jours, sans relation avec le sexe et l'âge. Ces observations sont d'un grand intérêt : si on veut mesurer les effets de traitements destinés à accélérer la croissance et si l'essai porte sur une période trop courte, cette période peut incorporer soit des périodes de stagnation et les résultats seront sous-estimés, soit incorporer des périodes d'accélération et les résultats seront surestimés ; le même raisonnement peut s'appliquer à des traitements orthopédiques et doit faire réexaminer les protocoles d'étude. Il se produit une augmentation séculaire de la stature qui a connu un maximum dans la

période 1970-1980. II y a une avancée constante du pic pubertaire, et ceci pour les deux sexes. Pour cette raison les standards devraient être mis à jour tous les 10 ans [127].
En effet, les mensurations réalisées sur des sujets vivants qui ont commencé leur puberté ne sont pas contributives, la marge d'incertitude qu'elles comportent étant beaucoup trop importante ; pour les utiliser il faut faire référence à des abaques correspondant à la population actuelle que l'on veut étudier. Or, les abaques utilisés remontent à pratiquement 35 à 40 ans et ne correspondent plus à la réalité de la population contemporaine : les adolescents actuels sont en moyenne beaucoup plus grands que leurs aînés, que ce soit en taille, en pointure de chaussure ou de gants, et se rajoute à cela le problème des immigrés [53, 54].
La taille est un paramètre somatique qui peut être influencé par plusieurs facteurs, citons [53, 54] :

- Les facteurs génétiques (taille des parents) et raciaux ;
- Les facteurs nutritionnels : certaines carences nutritionnelles ;
- Les facteurs endocriniens : plusieurs hormones interviennent dans la régulation de la croissance staturale.

a- Les deux segments et la taille

La taille résulte de l'augmentation de la longueur de deux segments : le segment supérieur qui est le rachis, et le segment inférieur représenté par les membres pelviens [127] :

- Avant la puberté, la croissance en taille prédomine dans les membres pelviens [16]. La répartition de la prise de taille est inégale jusqu'à la puberté : en moyenne, un allongement de 3 cm et demi par an pour les membres pelviens, et de 2 cm et demi par an pour le tronc [55].
- Au cours de la puberté, la croissance en taille prédomine dans le tronc, où le pic de croissance pubertaire est dû pratiquement au seul segment supérieur, à l'augmentation de hauteur des vertèbres [16] : au cours des deux premières années de la puberté, le gain de taille a lieu surtout dans le segment supérieur, puis au cours des trois dernières années on assiste à une décélération, où il reste 4 cm à grandir pour les filles (après les règles) et 5 à 6 cm pour les garçons après 15 ans. En contrepartie, les membres pelviens cessent de grandir chez la fille au moment des règles soit à 13 ans et 6 mois d'AO, et chez le garçon à 15 ans et 6 mois. La croissance restante des membres pelviens est faible dès le début de la puberté (toute décision d'épiphysiodèse doit se prendre avant la puberté) [55].

b- Les gains staturaux :

L'augmentation de taille est relativement lente pendant l'enfance. Le démarrage soudain débute juste avant la puberté, et commence plus tôt et se termine plus tôt chez les filles que chez les garçons [69]. La vitesse de croissance tend ensuite à s'annuler rapidement [16] :

- D'après les mensurations vertex-coccyx : la croissance en longueur est très graduelle depuis la fin de la quatrième semaine post-ovulatoire (= 5 mm), passant par la fin de la huitième semaine (= 30 mm), jusqu'au terme (= 310 à 350 mm) [69].
- Entre la naissance et la maturité, la longueur est multipliée par 3,5 environ. Un bébé grandit de presque un tiers de sa taille de naissance au cours des six premiers mois, et d'environ la moitié à la fin de la première année, et à peu près doublée à quatre ans [69].
- Après 10 ans, il reste en moyenne 35 cm à courir en taille debout dont 20 cm sur la taille assise [87].
- L'enfant prend 6 cm par an avant la puberté et 12 cm par an en période pubertaire [16].
- La taille adulte est atteinte à 15-18 ans chez la fille et 19-20 ans chez le garçon [16, 69].

La stature définitive est fonction de la vitesse de croissance et de la durée de la croissance ; un enfant petit dans la première enfance avec une puberté tardive et une croissance prolongée peut avoir une taille normale ; au contraire un enfant grand dans la petite enfance avec une puberté précoce et une croissance de courte durée peut avoir une taille définitive plutôt moyenne ou même petite [127].

c- Pronostic de la taille :

Les systèmes de prédiction sont basés sur l'évolution de la croissance des sujets normaux [127], ils expriment le potentiel restant de croissance staturale [16] et permettent une prévision de taille adulte à partir de la taille actuelle d'un enfant et de son AO [16, 127]. Deux systèmes sont utilisés :

- <u>La taille des parents :</u> elle a une influence évidente sur celle des enfants [27, 53, 54, 127], elle permet de prévoir la croissance et de déterminer la « taille cible génétique », qui est la taille finale prévisible que l'enfant devrait avoir si n'intervenaient que des facteurs génétiques [27, 87].

  La « taille cible génétique » est calculée selon la formule suivante [27, 87, 127]:

  Taille Cible (cm) = **Taille Père** (cm) + **Taille Mère** (cm) ± **13**/**2** ;

  [Avec : + 13 si garçon et –13 si fille]

$$\frac{\text{taille du père} + \text{taille de la mère} \pm 13\ \text{cm}}{2}$$

- <u>Les tables de Bayley et Pinneau :</u> ce sont les plus communément utilisées, permettent une prédiction de taille définitive d'un enfant à partir de sa taille et de son AO déterminé par l'atlas de Greulich et Pyle (GP) [16, 127].

d- Les courbes staturales :

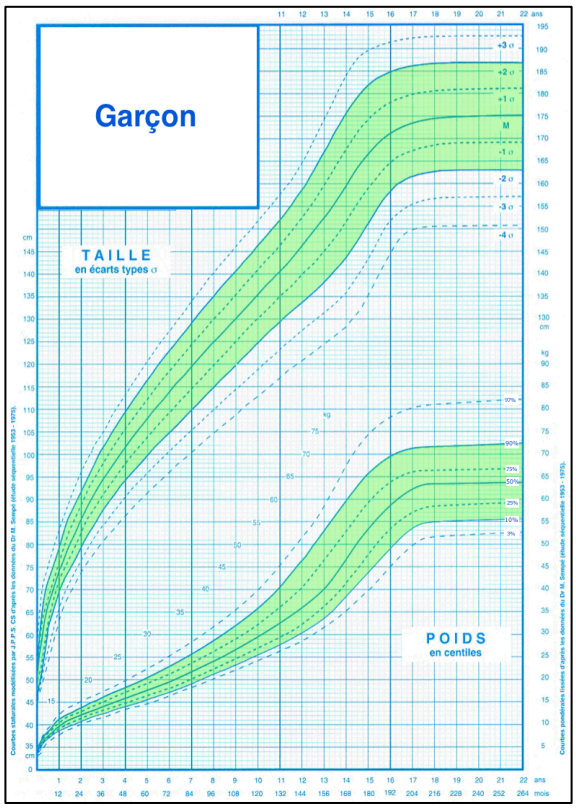
Les tailles des enfants pour un AC donné se distribuent de manière gaussienne [27].

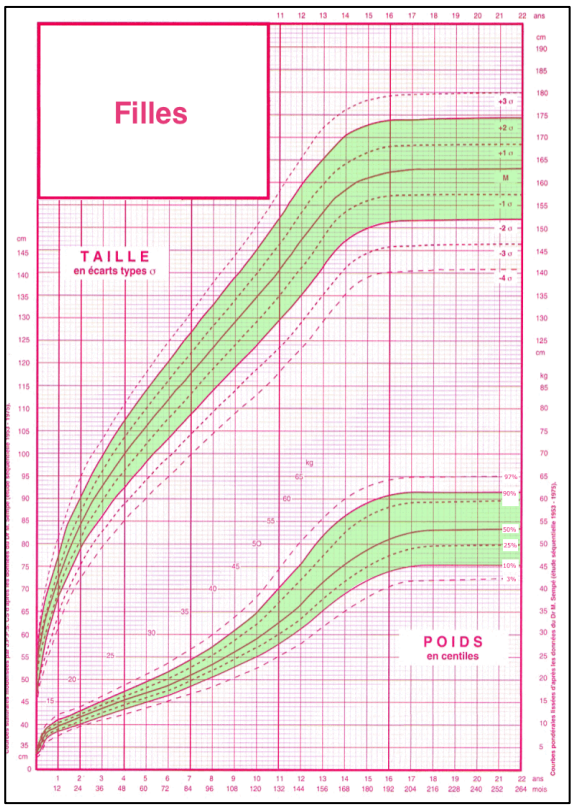
Le niveau statural (de taille) est exprimé en déviation standard (DS) [27, 87] ou en percentile, en références aux courbes de croissance d'enfants du même sexe de Sempé et al. [27].

Un percentile donné est la limite en dessous de laquelle se trouve le pourcentage correspondant de la population normale, par exemple : 3 % des enfants ont une taille en dessous du 3ème percentile [27].

Les tailles de 95 % des enfants bien portants sont entre -2 DS (proche du 3ème percentile) et +2 DS (proche du 97ème percentile) [27, 87]. Cela correspond à une taille adulte comprise entre 152 et 174 cm chez les filles et entre 163 et 187 cm chez les garçons (courbes ci-dessous) [27].

Les courbes de croissance taille/poids utilisées en pédiatrie ne peuvent permettre de déterminer un âge. Elles servent seulement à déterminer s'il existe une certaine harmonie ou non dans le développement d'un enfant [53, 54]. En effet, un trouble de croissance doit être recherché lorsque l'enfant voit sa taille sortir de ces valeurs. D'autres éléments peuvent être préoccupants tels que la discordance entre la taille de l'enfant et celle des parents, une vitesse de croissance anormale pour l'âge, une différence de plus de 2 ans entre l'AO et l'AC. De telles constatations doivent faire engager un bilan étiologique qui doit être conduit en milieu pédiatrique [87].





Figures 6 et 7 : Les courbes staturales et pondérales, pour garçons et filles, selon Sempé.

Courbe Taille et Poids des enfants | catherine-poggi.eu

e- En pratique : Comment mesurer une taille ?

L'appréciation de la croissance doit tenir compte de [16] :

- La taille des parents de l'enfant ;
- L'âge réel (AR) de l'enfant, c'est l'âge civil (AC) de l'enfant ;
- L'âge statural (AS) de l'enfant, c'est l'âge qui correspond à sa taille ;
- L'âge osseux (AO) de l'enfant, qui correspond au stade de sa maturation osseuse ;
- La vitesse de croissance de l'enfant, calculée par la différence de deux tailles mesurées à deux moments différents, puis diviser ce changement par la durée.

La taille doit être mesurée avec soin, par une personne entraînée, et avec un matériel fiable (microtoise, mètre ruban, toise murale…).

Il existe plusieurs formes de taille, mesurées de plusieurs manières :

- La stature :
  C'est la taille du sujet en position debout, mesurée sur une toise murale. Le sujet doit être redressé le long d'un plan vertical aussi rigide que possible, talons collés l'un contre l'autre et contre le mur, genoux étendus, regard horizontal [27, 132].
- L'étendue :
  C'est la taille du sujet en position couchée, mesurée sur un plan dur, genoux étendus, pieds à angle droit sur les jambes ; elle est la seule qui soit accessible avant 4 ans [27, 132].
- La mesure du buste :
  C'est la taille du sujet en position assise, sur un plan dur [49, 132].
  Cette mesure se fait aussi sur un sujet couché sur un même plan dur, cuisses mises à angle droit [135], c'est un moyen simple de déterminer la longueur des membres pelviens [132, 135].
- L'indice Skélique (de Manouvrier) :
  C'est le rapport « segment inférieur/segment supérieur », c.-à-d. « longueur des jambes/taille, sujet assis » [49, 135].
  [Segment supérieur = buste ; Segment inférieur = jambes [49]]
- L'indice cormique (de Vallois) :
  C'est le rapport « segment supérieur sur taille » [135].

2- Poids :

Pendant toute la période de croissance, le poids est le meilleur et le plus simple des indices [55, 69], cependant, il n'aurait de véritable sens qu'en fonction de la taille [135].

Le poids est mesuré à l'aide d'une balance électronique portative, et exprimé en kg [49].

Le poids du nouveau-né est quelques milliards de fois plus élevé que celui de l'ovule, alors que le poids de l'adulte n'est que vingt fois supérieur à celui du nouveau-né. En effet, le poids des nouveau-nés à terme varie de 2,75 à 4,5 kg (3,5 de moyenne), à trois mois il est de 5,7 kg. Le poids de naissance est triplé à la fin de la première année, quadruplé à la fin

de la seconde [69]. Et de façon générale : 20 kg à 5 ans, 30 kg à 10 ans, 60 kg en fin de croissance [55].

Les filles sont relativement plus légères que les garçons du même âge pendant la première et la seconde enfance, mais d'habitude plus lourdes au moment de la puberté. Après les deux ou trois premières années de l'adolescence, les garçons sont à nouveau plus lourds que les filles [69].

3- Indice de masse corporelle (IMC) :

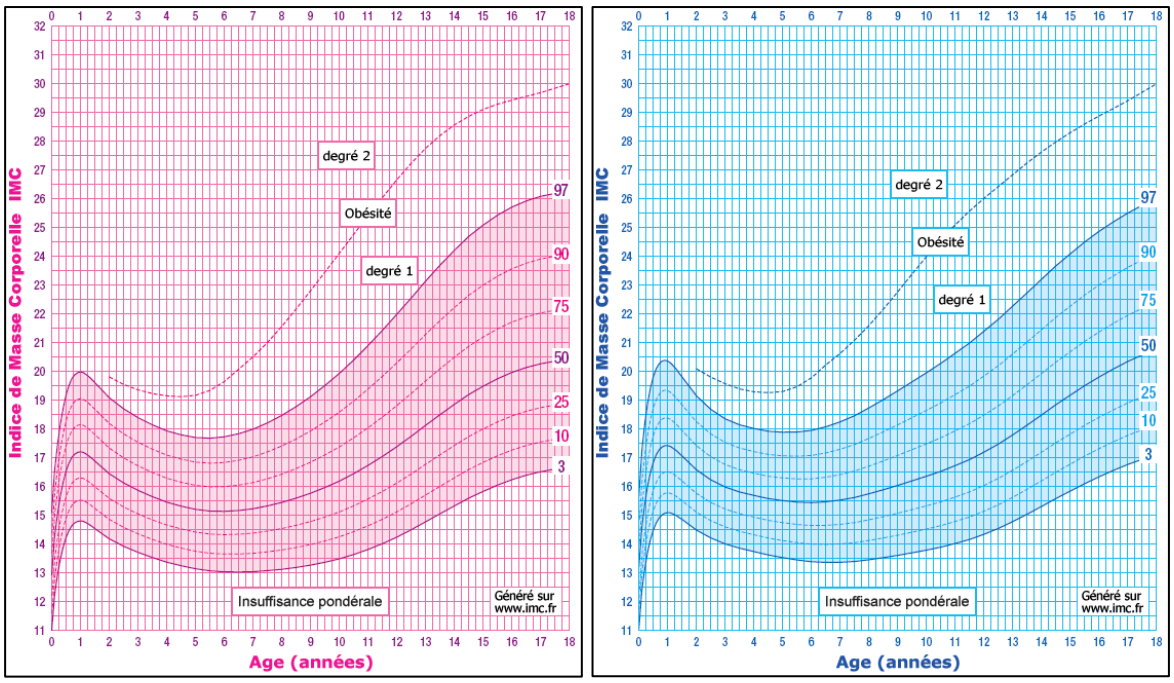
Appelé également : l'indice de corpulence [27, 49], le coefficient de Somatotence [135] ou l'indice de Quételet ; il correspond au rapport [27, 49, 135] :

IMC = Poids (kg) **/ Taille²** (m^2)

Cet indice permet d'apprécier la courbe pondérale qui comprend, en plus l'IMC, le poids rapporté à la taille, et permet aussi de ne pas tenir compte de la taille uniquement et reflète indirectement la masse grasse corporelle [27].

Bien qu'il n'ait de sens que chez l'adulte en fin de croissance [135], puisque le Quételet n'a pas œuvré pour l'infance, l'enfance et l'adolescence [132], l'indice de Quételet est calculé à tous les âges [49]. Chez l'enfant, cet indice varie avec l'âge et le sexe (courbes ci-dessous), il augmente la première année et passe par un maximum à 12 mois, pour diminuer ensuite et passer par un minimum vers 6 ans, pour remonter ensuite et atteindre vers 20 ans une valeur proche de celle de l'adulte (20,5 kg/m2 chez la fille et 22 kg/m2 chez le garçon) [27].

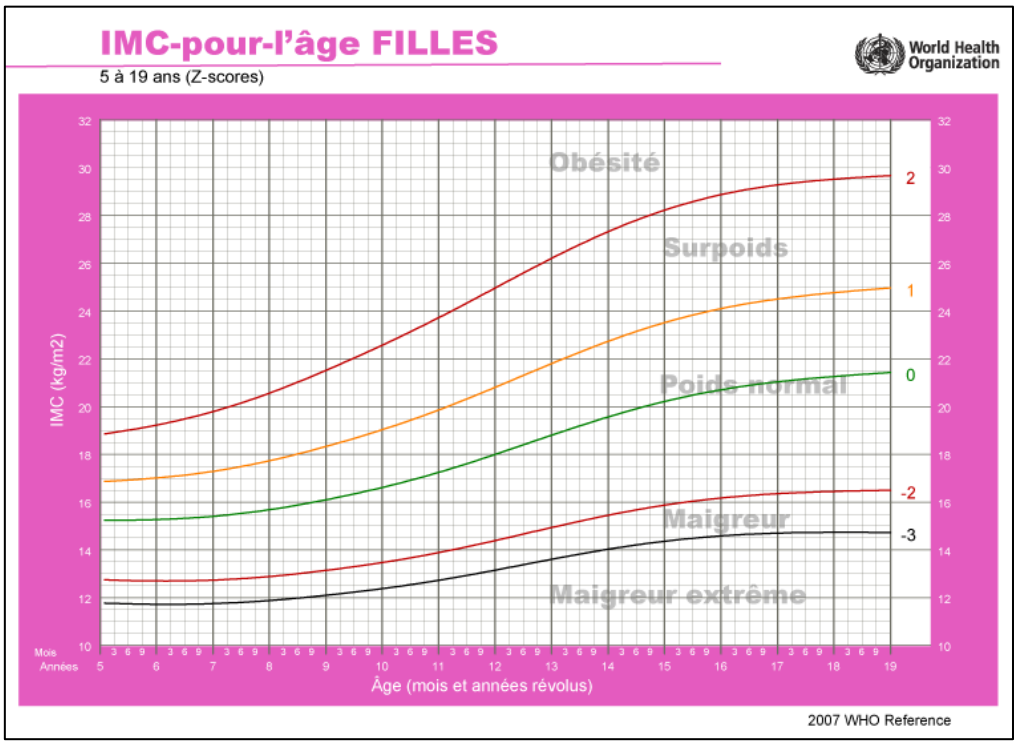
La remontée de l'IMC après 6 ans est appelée « le rebond d'adiposité » : s'il survient trop tôt et en excès, il comporte un risque élevé de développer une obésité dès l'enfance et surtout à l'âge adulte. Le suivie de ce « rebond » sur la courbe de corpulence permet de repérer précocement un changement de couloir de corpulence [27].

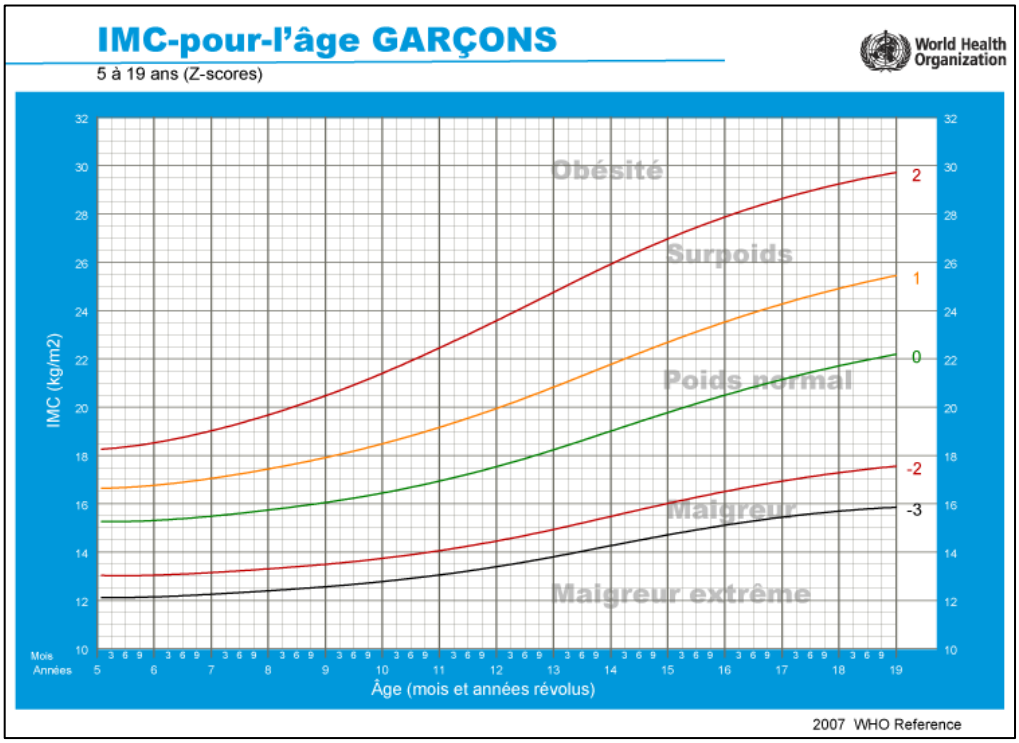


Figures 8 et 9 : Les courbes de corpulence, filles et garçons.
(Courbes générées sur : www.imc.fr)

Ces courbes de corpulence sont établies en centiles, ce qui permet de définir les zones d'insuffisance pondérale (< 3ème percentile), de normalité (3ème - 97ème percentile) et d'excès pondéral (> 97ème percentile) [27].

Sur ces mêmes courbes (ci-dessous), sont désignés les couloirs de surpoids (IMC > 25) et de l'obésité (IMC > 30) [49].





Figures 10 et 11 : Les courbes de corpulence normale, avec couloirs d'insuffisance pondérale et d'excès pondéral (courbes OMS). Étude sur l'obésité infantile | Eufic

4- Autres paramètres :

a. Surface corporelle :

C'est le rapport de la surface à la masse du corps ; elle a une grande influence sur le métabolisme de l'individu, et entraîne une perte de chaleur beaucoup plus importante [69].

La surface corporelle est relativement grande chez le nouveau-né : est de 2000 à 2500 cm^2 à la naissance, elle double pendant la première année et triple au milieu de l'enfance. A la maturité, elle est environ sept fois plus grande qu'à la naissance. Elle subit une diminution relative pendant la vie postnatale, de 800 cm^2/kg à la naissance à 300 cm^2/kg chez l'adulte [69].

b. Plis cutanés, tricipital et sous-scapulaire :

Les mesures des plis cutanés sont effectuées avec un compas de Harpenden [49].



Figure 12 : Compas de Harpenden

D_NQ_NP_812919-MLB51338140996_082022-O.jpg (500×479) (mlstatic.com)

c. Périmètre crânien :

Il est mesuré et rapporté à l'AC [27], à l'aide d'un mètre ruban [49], de l'occiput en arrière et juste au-dessus des arcades orbitaires en avant [69].

Entre la naissance et 3 ans, le périmètre crânien augmente de 15 cm ; entre 3 et 18 ans de 5,5 cm [27].

d. Périmètre brachial :

Il est mesuré à l'aide d'un mètre ruban [49]. C'est un reflet partiel de la musculature et de l'adiposité [135].

e. Pourcentage de masse grasse brachiale :

Il est calculé à partir du périmètre brachial et du pli cutané tricipital [49].

f. Périmètre thoracique :

Il est mesuré au niveau des mamelons, sujet couché [69].

g. Diamètre bi-iliaque :

Appelé aussi, diamètre des hanches [135]. C'est la distance entre les deux crêtes iliaques [69].

h. Diamètre des épaules : [135]

Appelé aussi, diamètre bi-acromial

5- Au total : comment mener une enquête auxologique ?

Les enquêtes auxologiques s'inscrivent dans deux voies : la recherche scientifique et l'examen clinique de l'enfant et de l'adolescent.

a- L'enquête auxologique pour recherche :

Les tables, les abaques, les courbes, etc… sont obtenues grâce à des mensurations faites selon un des trois types d'études : longitudinale, semi-longitudinale et transversale [69, 132] :

- Les études longitudinales : appelées aussi séquentielles [132], elles impliquent un suivi des mêmes individus pendant une durée qui peut être longue [137]. Ces études fournissent des données sérielles du même sujet permettant l'analyse détaillée de la croissance et du développement [7], même d'affiner l'analyse des modifications du rythme de la croissance dans le temps [49], et permettant aussi d'établir la courbe de croissance individuelle, d'évaluer les vitesses de croissance et donc la dynamique de la croissance [7, 69]. Un des avantages les plus importants d'une étude séquentielle est d'avoir des examens et des radiographies à intervalles réguliers, aux anniversaires et aux mi-années : le temps de croissance et de maturation, est comme découpé en tranches équidistantes et le tracé des courbes rejoint facilement des points séparés par une durée identique quel que soit l'âge [137].
- Les études semi-longitudinales : appelées aussi semi-séquentielles, ou discontinues, étudient plusieurs groupes d'enfants (très jeunes, pré-pubères et adolescents) simultanément. Ces études ont l'immense avantage d'une plus grande rapidité et peuvent être reproduites plus facilement, mais ne sont pas aussi riches d'informations, surtout dans les périodes d'âge sensibles comme celle de l'adolescence [132].
- Les études transversales : réalisées à partir de mesures uniques prises chez des sujets différents à chaque âge [7], mais du même âge [69]. Ces études, si elles ont un intérêt évident en épidémiologie, ne sont que des « instantanés » [132] et ne permettent pas d'avoir une connaissance de la croissance, et moins encore de la maturation, comme le suivi régulier d'un même enfant au décours des semestres successifs [49, 132]. Les observations transversales sont faites à une date donnée sur des individus d'âges différents, à raison d'une observation par individu. Les observations transversales peuvent tout au plus donner l'état statistique d'un groupe d'individus, à un instant donné, relativement à la chose observée, et sont incapables de rendre compte de l'évolution temporelle individuelle [138], et donc ne permettent pas d'observer précisément les changements qui interviennent dans les processus de croissance [49].

Cependant, la majorité des études de croissance sont en fait transversales [7]. Elles sont utilisées principalement comme repères [69], les résultats des études transversales peuvent être intéressants, car ils permettent d'estimer la tendance centrale d'une population et la variation de données de croissance à chaque âge. C'est aussi à partir de données transversales que des courbes percentilées, qui sont des courbes de référence portant des normes de croissance, sont établies, illustrant la croissance « moyenne » et les limites de la variation « normale » dans une population. Ces études transversales de la croissance sont donc intéressantes au niveau épidémiologique et au niveau de l'analyse de l'influence des facteurs génétiques et mésologiques, c'est-à-dire d'environnement au sens large [7].

b- L'enquête auxologique pour examen clinique :

La croissance d'un individu est évaluée en confrontant les données de l'interrogatoire, les développements staturo-pondéral et pubertaire, la formule dentaire et la radiographie de diverses parties du squelette [53, 54] :

- L'interrogatoire cherchera à évaluer : les antécédents du sujet, son mode de vie, sa maturité, ses centres d'intérêt, son niveau de scolarisation ; à reconstituer les différentes étapes de son développement pubertaire et les éventuels impacts de sa vie d'enfant ou d'adolescent ayant pu retentir sur sa croissance [53, 54]. Chez les filles, l'âge des premières règles est demandé lors des visites entre 10 et 16 ans, et éventuellement le poids et la taille des parents (mesures calculées ou déclarées) [49].
- L'examen somatique consiste à réaliser un examen physique externe de la personne en évaluant notamment sa corpulence, la présence ou l'absence des caractères sexuels secondaires [21, 53], le rapport staturo-pondéral et la répartition des masses graisseuses [53]. L'accent sera souvent mis sur les dents de sagesse, la pilosité faciale ou pubienne en combinaison avec l'apparence physique ; bien qu'un examen pareil peut souffrir des mêmes faiblesses que l'examen osseux, car l'apparition de la puberté peut varier de plusieurs années entre un individu et un autre, cela est d'autant plus vrai lorsqu'ils sont d'origines ethniques différentes. Cette méthode ne permet en définitive que d'établir un âge physiologique et non un AC certain [21].

  Pris isolément, le niveau de taille ne permet pas de conclure quant au caractère normal ou non de la croissance. La courbe de croissance staturo-pondérale et celle de l'IMC sont les documents clés permettant d'analyser la croissance et de statuer sur sa normalité ou son anormalité [27].

  Il faut reporter la taille mesurée en centimètre sur la courbe de croissance et déterminer ainsi la taille en DS pour l'âge et le sexe. Il faut faire de même pour le poids et le reporter sur la courbe de croissance pondérale pour en déterminer sa DS pour l'âge et le sexe. On complète en calculant l'IMC et en le reportant sur la courbe de corpulence de manière à en déterminer le percentile pour l'âge et le sexe. À l'aide du carnet de santé, on trace les

courbes de croissance staturale, pondérale et de corpulence de manière à les analyser en parallèle. En effet, il est important d'apprécier la vitesse de croissance staturale en parallèle de l'allure de la courbe de corpulence afin d'identifier une vitesse de croissance staturale anormale, une croissance pondérale anormale pouvant motiver un bilan complémentaire [27].

Ces courbes de croissance et abaques, corrélés aux mesures d'AO [87] sont faites à partir d'études récentes d'enfants et d'adolescents de même âge, sexe, race et environnement. Les normes ont de grande variabilité, qui reflètent les divers modes de croissance chez des enfants différents [69].

Dans l'enquête auxologique, il est important de repérer si la taille se situe à plus ou moins 1,5 DS de la taille cible. En effet, les mensurations de naissance sont reportées, surtout, la notion de RCIU (retard de croissance intra-utérin) est à identifier : il s'agit d'une taille de naissance et/ou d'un poids de naissance inférieur à –2 DS pour le terme selon les références de Usher et McLean [27].

Certains enfants présentent un retard simple de la croissance et de la puberté avec AO = AS < AR. Le problème se pose à l'âge du début présumé de la puberté. Ces mêmes enfants ne sont pas pubères ; ils ont une taille, une morphologie et un potentiel musculaire inférieurs à ceux de leurs camarades, qui ont une maturation pubertaire en rapport avec leur AR. Ils devraient, en fait, être sous-classés (dans leur catégorie d'AO). À l'opposé, un garçon de 13 ans ou une fille de 11 ans, grands pour leur âge et pubères depuis deux ans auront un potentiel musculaire de 15 ans pour le garçon et de 13 ans chez la fille. Ils pourront, de façon évidente, être surclassés [16].

En résumé, le suivi de l'état de santé d'un enfant comporte obligatoirement la surveillance régulière de la croissance de sa taille, de son poids, de sa corpulence et de son périmètre crânien, qui sont le reflet de son état de santé, de ses conditions de vie et de son potentiel génétique.

L'observation clinique répétée reste indispensable pour porter un diagnostic et surtout pour effectuer une prévision fiable du statut en fin de croissance [87]. Les courbes de croissance et les abaques (tables), qui ne doivent pas remplacer l'examen clinique, permettent d'évaluer l'état physique et le déroulement du processus de croissance [69] et d'effectuer de telles prévisions avec une précision intéressante [87]. À la naissance, et en fonction du terme, ces tables permettent d'apprécier la normalité de la taille, du poids et du périmètre crânien, et d'identifier les enfants présentant un RCIU [27].

Le médecin peut rassurer les parents ou l'enfant sur la normalité de la croissance. À l'inverse, son rôle est d'être interpellé par les extrêmes de la croissance et/ou du développement pubertaire, pour savoir effectuer les investigations complémentaires si nécessaire, afin de ne pas méconnaître une authentique pathologie qui en serait responsable et dont le traitement étiologique permettrait de normaliser au plus vite la croissance et/ou le développement pubertaire [27].

IV- L'AGE ET SA DETERMINATION

1- Définition de l' « âge » :

Plusieurs tentatives de définition du mot "âge" depuis les célèbres dictionnaires français qui ne sont guère instructives [135] :

- Durée ordinaire de la vie (Littré, Larousse) ;
- Vie humaine considérée dans sa durée (Robert) ;
- Avancement dans la vie (Larousse) ;
- Temps écoulé depuis qu'un homme est en vie (Robert) ;
- Carrière de la vie que l'on a à parcourir et qui a un commencement, un milieu et une fin (Littré) ;
- Le temps présent ou écoulé (Littré) ;
- Temps écoulé depuis la naissance d'un individu (Dictionnaire de Médecine Flammarion-1975, Le Garnier Delamare-1997 … etc

Quoiqu'il en soit, on voit que la détermination d'un âge ne demeure guère guidée par une définition précise, sinon par une autre tautologie, une vérité d'évidence, un truisme [135].

2- Filières de fixation de l' « âge » :

Il existe quatre filières de fixation de l'âge :

a- La fixation légale [135], nécessitant une pièce d'état civil, qui s'impose lors :
   - D'une déclaration de naissance intangible dans les pays ;
   - De l'établissement de documents officiels d'identité ;
   - De l'établissement de documents administratifs réglementaires (scolaires, sportifs, militaires, du travail, de protection sociale...).

b- La fixation sociale [135], en raison de :
   - La notoriété,
   - Le constat d'existence depuis un certain temps par les parents, les témoins, l'entourage proche ou lointain tel celui constitué par le voisinage, l'école, les associations, les clubs.

c- La fixation médicale (ou médico-anatomo-physiologique) :

Le médecin s'intéresse à la détermination de l'âge pour prévenir, durant l'enfance et l'adolescence, des évolutions défavorables liées à des affections particulières (hormonales, orthopédiques, locomotrices ou autres) qui peuvent ralentir ou modifier la croissance et la maturation, donnant par conséquent un aspect extérieur (morphologie), intérieur (fonctions intellectuelles) ou relationnel (capacité d'occuper un poste de travail) ne correspondant pas à l'âge d'état civil. Une fois l'âge adulte acquis, « l'âge précis » devient une notion médicale très contingente [135].

d- La fixation juridique :

Cette voie apparaît lorsque les trois filières ne sont pas adéquates ; la détermination de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent de l'un ou l'autre sexe devient une procédure d'identification médico-légale qui ne peut s'envisager que sur injonction et ordonnance d'un magistrat instruisant une affaire parfaitement définie [135].

La détermination approximative de l'âge est une question médico-légale de la plus haute importance [34, 135] ; elle se lie à celle de l'identité [135].

Cette détermination est basée sur l'association de l'examen clinique (poids, taille, étude dentaire et étude des stades pubertaires) et sur l'estimation radiologique de l'AO [34, 135].

3- Différents types d' « âge » et leur détermination :

a- Age chronologique :

Appelé également, l'âge d'état-civil [132] ou l'âge civil [127] l'âge réel [16].

C'est la durée d'existence [127], mais il demeure totalement insuffisant pour apprécier la croissance, les développements et la maturation. Il importe, dans une certaine mesure, de s'en défaire résolument [132].

b- Age biologique ou physiologique :

L'âge physiologique d'un individu est déterminé par la synthèse des différents critères mesurés : la maturation squelettique, la maturation dentaire, la maturation sexuelle, les données anthropométriques [21, 53, 54, 69, 127].

La médecine utilise en effet, ces critères non pas pour déterminer l'AC, mais pour apprécier l'âge biologique dans un contexte médical [52].

c- Age dentaire :

L'âge dentaire est un complément intéressant de la détermination de l'âge. L'ordre d'apparition des dents est assez constant et il existe des atlas qui permettent de comparer un sujet donné à une table de référence. En période pubertaire, l'étude précise de la racine de la troisième molaire permet une cotation plus étroite en comparant le diamètre du canal dentaire à celui de la racine [4].

La radiographie panoramique dentaire destinée à examiner le développement de la dentition. Cependant, ces radiographies ne sont habituellement destinées qu'à un traitement orthodontique afin de déterminer la possibilité ou non d'une intervention dentaire en fonction de l'état du développement [52].

d- Age médical, ou **« médico-anatomo-physiologique » :**

En situation habituelle, les mensurations correctement connues donneront un pourcentage mieux qu'un « âge » qui ne sera généralement qu'une moyenne ou une médiane qui ne représente en fait qu'un seul individu sur cent ; on peut désigner ces « âges » comme « auxiques » dans la mesure où ils sont toujours changeants sans liaison absolue, ou encore « somatiques » puisque ce sont essentiellement des données corporelles [135], on cite par exemple :

- L'âge (ou %) « statural » : correspond à celui trouvé, exprimé en mois, en face de la mesure de la taille dans les tableaux de référence selon le sexe ;
- L'âge (ou %) « pondéral » : qui n'aurait de véritable sens qu'en fonction de la taille ; on rejettera toujours le calcul du coefficient de somatotence, dit de Quételet, mais qui n'a de sens que chez l'adulte en fin de croissance ;

e- <u>Age osseux :</u>

L'âge osseux (AO), appelé aussi l'âge squelettique, est une notion qui s'est adoptée dès le début du 20ème siècle [35], elle exprime habituellement l'état du squelette [69], c'est une tentative chiffrée d'évaluation de la maturation squelettique à partir de grandes études statistiques [32, 89]. En effet, pour un individu donné, l'AO correspond à l'état de sa maturation squelettique en référence à celle de la majorité des individus de même sexe et de même âge [32, 62], il exprime la moyenne des âges chronologiques des sujets ayant atteint le même degré de maturation osseuse. C'est donc une notion relative qui dépend du groupe à partir duquel a été établie la correspondance maturation squelettique - âge osseux [127].

La détermination de l'AO concerne les trois stades de maturation : la maturation prénatale, la maturation postnatale de l'enfance et la maturation de l'adolescence [4].

L'âge squelettique est lié à des variations raciales et sexuelles, influencé par des facteurs nutritionnels et d'environnement et est en bonne corrélation avec la taille, le poids et le développement sexuel [69].

- <u>La relation « âge osseux » - âge civil :</u>

  L'âge osseux est un reflet du degré du développement et de maturation du squelette de l'enfant ou de l'adolescent en croissance [3, 36, 62, 87], c'est un meilleur critère du stade de développement et de croissance mieux que l'âge chronologique ou civil [69]. En effet, l'AO est plus fiable que l'AC, bien que ces deux données ne soient véritablement synchrones que chez un enfant sur deux [55] : 40 % des enfants ont un AO en phase avec leur AC [127]. En fait, l'AO n'est pas forcément exactement concordant à l'AC, car il reflète le degré de maturation de l'os, qui peut être avancé ou retardé [67], et quelles que soient les limites de l'utilisation de l'AO, il reste l'examen de référence pour caractériser la croissance des enfants et adolescents [32].

  Pour réaliser la datation de l'AO, la maturation osseuse a été comparée à l'AC des enfants. Cet AO est forcément approximatif [3, 87] et s'estime au mois près [132].

  L'AO n'a pas la « simplicité » de l'AS dans son ordre d'apparition [137], il n'a pas l'aspect « linéaire » de l'AC dans son l'évolution [87, 132] : la maturation osseuse est complexe et elle évolue de façon différente avec périodes d'accélération et de ralentissement [87].

- Les insuffisances de l' «âge osseux » :

  Néanmoins, le concept de l' « âge osseux » ne manque pas d'insuffisances :

  - Un manque de précision : il n'y a pas un « AO » témoin d'une maturation idéale, mais deux limites supérieure et inférieure entre lesquelles les « équivalents en âge de la maturation squelettique » ont la même signification, voire la même conséquence immédiate, celle d'être une des manifestations de la maturation habituelle qui ne se réduit pas à un point sur une bissectrice [137] ;
  - Un concept flou : une « année osseuse » n'aurait de sens, en toute rigueur, que si chaque année apportait la même quantité d'ossification, c'est l'idée d' « isochronie » dans la progression osseuse [139] ;
  - Un « âge » variable : l'« année osseuse » n'a pas la même signification pour deux enfants bien portants, ni même pour deux os chez le même enfant. Deux enfants de même AC peuvent être à des stades de maturation très différents : l'un fera « une maturation de 15 mois en 1 an » et l'autre seulement de 9 mois [127]. aussi, chez les garçons, la 13ème année osseuse représente beaucoup plus que la 6ème [137]. En fait, aucune « année osseuse » n'est identique à la précédente [127, 137] ou la suivante, ce qui s'oppose tout à fait à notre acceptation intangible du temps chronologique [137] ;
  - Une « année » à vitesse variable : la vitesse de maturation d'une année osseuse n'est pas constante d'un bout à l'autre du développement, elle dépend de l'âge de l'enfant quel que soit son sexe [137]. Ainsi en une année civile, à 12 mois, un enfant peut avoir une maturation osseuse qui est l'équivalent de 18 mois [127] ;
  - Un « âge » variable selon le sexe : les filles murissent plus vite que les garçons [127, 137] ; l'année osseuse comprend donc plus d'évènements, l'acquisition d'un nombre plus grand d'indicateurs de maturité chez la fille que chez le garçon, bien que le résultat final, c.à.d. la maturité adulte, sera identique quoique décalée dans le temps [137] ; il nous faut donc une année osseuse par sexe [127, 137].

  Et pourtant, l'emploi de l'« AO » demeure de routine malgré toutes ces inadéquations [139].

- L'évaluation de l' « âge osseux » :

  L''évaluation de la maturation osseuse est basée sur l'étude radiologique de l'os [35]. En effet, l'examen radiographique d'une partie limitée du corps permet une appréciation suffisante de l'état du reste du squelette. L'état de la main est la référence habituelle, puisque « la main se développe parallèlement au squelette » [69], et puisque aussi le risque lié à l'irradiation

X soit des plus minimes étant donné la situation du membre thoracique aisément isolable [132].

Pratiquement, les clichés doivent être de bonne qualité dès leur saisie ; elles doivent être immédiatement transcrites puis conservées ; elles imposent une interprétation correcte instantanée ou retardée [132].

- Les méthodes d'évaluation de l' « âge osseux » :

La détermination de l'AO suit un rituel rigoureux qui comporte une description attentive et une discussion à la fois analytique et synthétique. Cette méthodologie s'inspire des études souvent très poussées concernant la croissance et la maturation de l'enfant et de l'adolescent. Les radiologues, ou ceux utilisant des clichés radiographiques, ont également apporté leur pierre à l'édifice en publiant des atlas (Greulich et Pyle, Hoerr et Pyle, Roo et Schröder, Schmid et Moll, Sempé et Pavia), des abaques, des indices [135].

Sur ce chemin, de très nombreuses méthodes ont été apparues, concourent pour évaluer la maturation osseuse ; la méthode idéale qui allierait simplicité d'emploi, reproductibilité et précision n'existe pas encore [89] :

- Les méthodes basées sur la radiographie du squelette : main-poignet, coude (méthode de Sauvegrain), genou, clavicule, pied, crête iliaque (méthode de Risser) [35, 55]. L'étude des caractères radiographiques des os donne des indications précieuses pour évaluer la croissance normale et anormale [69] ;
- Les méthodes basées sur le panoramique dentaire [35].

La méthode la plus utilisée est celle de la radiographie de la main et du poignet [23, 89], et afin d'évaluer la maturation squelettique, ces méthodes offrent trois types de techniques [89] :

- Soit, la numération des points d'ossification [89] ;
- Soit, la cotation, qui consiste à chiffrer les points d'ossification en fonction de leurs dimensions et formes [89] ;
- Soit, enfin, le recours à un atlas, en comparant de façon rigoureuse et méthodique, la radiographie du poignet et de la main gauche de l'enfant, aux images d'un atlas [23, 24, 89].

Il peut exister des dissociations entre la maturation des doigts et la maturation du carpe, mais on donne toujours la priorité aux doigts dans l'appréciation de la maturation. En tout cas, l'important n'est pas la valeur stricte à un moment donné, mais le profil évolutif de l'AO [89].

L'utilisation des méthodes de détermination de l'AO assistée par ordinateur, comme celles de Tanner et Whitehouse (computer-assisted skeletal age score : CASAS) ou de Sempé (MATUROS), a permis d'améliorer sa précision et de diminuer le risque d'erreur lié à l'interprétation radiographique [32], puisque les radiographies sont objectives en elles-mêmes, subjectives quant à leur interprétation qui ménagera une assez large zone d'appréciation

[135]. Néanmoins, les critères retenus pour sa détermination demeurent les mêmes que pour l'AO standard et reposent sur l'apparition des noyaux d'ossification, la soudure des cartilages de conjugaison et/ou les modifications des noyaux d'ossification [32].

- Les limites :
  - La détermination de l'AO n'a d'intérêt que si elle est pondérée par un examen clinique complet. En effet, l'AO ne représente qu'un élément du développement d'un enfant ou d'un adolescent qu'il est nécessaire d'intégrer dans un contexte clinique et biologique plus complet telles : l'analyse des critères anthropométriques, l'analyse de la maturation sexuelle et l'évaluation de la formule dentaire [3, 4, 21, 53-55, 62] ;
  - La mesure du degré de maturation est difficile car il existe des variations physiologiques entre les individus normaux du même âge et l'évolution osseuse des filles et des garçons, de même chez un enfant, fille ou garçon, la maturation osseuse n'a pas une vitesse constante qui dépend de l'âge de l'enfant [127].

4- Au total : comment déterminer un âge ?

En tenant compte des importantes variations ethniques et statistiques, on aboutit à des identifications approchées et la détermination de l'AC probable découlera plus d'un consensus à plusieurs que de l'intime conviction pouvant provenir de l'analyse de données mathématiques [135]. En effet, cette détermination approximative de l'âge est basée sur l'association de l'examen clinique et sur l'estimation radiologique de l'AO [34, 135]. La radiographie doit donc être toujours couplée à un examen clinique permettant d'évaluer le développement staturo-pondéral et pubertaire de l'enfant et d'orienter ainsi l'évaluation de l'âge physiologique [23]. Sinon, lorsque les données auxologiques et radiologiques manquent ou sont dépassées, aucune détermination de l'âge tant soit peu précise n'est possible. L'âge chronologique ne sera estimé que de manière probabiliste, dans une fourchette qui ne saurait être inférieure à une ou même deux années chronologiques [135].

Pour plus d'exactitude et rentabilité, l'âge sera déterminé par la radiographie, la morphologie, les critères de maturation sexuelle et le comportement, comme suit :

a- La radiologie :

L'examen radiologique des os, a permis d'étudier le développement squelettique et d'en chiffrer le degré, véritable paramètre de l'état biologique d'un enfant [23].

L'examen radiologique cherche et évalue les « indicateurs de maturation » qui sont par définition : les caractéristiques des os qui peuvent être vues aux Rayons X, et qui, à cause de leur ordre d'apparition régulier définitif et irréversible, marquent leur avance vers la maturité. Un indicateur de maturation n'est autre alors qu'un des osselets ou une des épiphyses dont l'évolution va, par degrés progressifs, parcourir l'étendue de son expansion osseuse avant de parvenir à sa maturité, signe et symbole d'un acquis définitif. En fait, il ne s'agit bien que de la

projection sur le film radiographique de phénomènes se déroulant dans l'espace et inaccessibles autrement, et cette « restriction bidimensionnelle » ne doit cependant pas être considérée comme une « réduction excessive » de l'information contenue dedans. Cette étape d'identification et de description des déterminateurs ou indicateurs de maturation était immense. C'était possible, par la simple inspection, de juger du développement de chaque centre d'ossification en étudiant la forme des images réalisées par le tissu osseux en formation au fur et à mesure qu'il remplaçait le cartilage transparent [137].

Ainsi, l'analyse radiologique consiste à apprécier le degré de maturation des points d'ossification des os [126], elle va repérer l'existence de ces indicateurs de maturation, dont il faut les connaître en leur existence avant de pouvoir affirmer qu'ils sont absents : toute apparition d'un des indicateurs retenus est à elle seule la première manifestation radiologique de l'ostéogénèse [137]. Cette analyse va permettre de comparer cette radiographie aux radiographies de l'atlas du même sexe, pour trouver celle dont l'aspect s'approche le plus, et d'affiner la corrélation entre l'AO ainsi déterminé et l'AC [126].

Enfin, il importe de disposer de standards donnant les âges habituels d'apparition et de soudures des points d'ossification. Ces tables de référence doivent distinguer les garçons et les filles, puisque la vitesse de maturation osseuse étant plus rapide chez ces dernières, et indiquer en plus de la maturation moyenne, les limites des variations physiologiques [139].

b- La morphologie [135] **:**

Son étude ne se référera pas toujours à des mensurations précises, mais plutôt à une impression d'harmonie ou de dysharmonie segmentaire et diamétriques (étroitesse relative des hanches et/ou des épaules), de tonicité musculaire, abdominale entre autres, de dépôts adipeux plus ou moins perceptibles, de la chevelure, de la pilosité, des cicatrices, de port de bijoux incrustés, etc.

Les mensurations correctement connues ont une grande importance :

- La stature (taille du sujet debout) et l'étendue (taille du sujet couché) fournissent une donnée en millimètres d'où il est tellement aisé et dangereux de déduire un « AS médian » ;
- Les segments supérieur de la taille du sujet assis et inférieur (par différence du segment supérieur et de la taille) : il en découle un ou deux « âges segmentaires médians » ;
- Le poids qui permet d'avoir un « âge pondéral médian » qui n'aurait de véritable sens qu'en fonction de la taille ;
- Les périmètres qui sont un reflet partiel de la musculature et de l'adiposité ;
- Les diamètres des épaules et des hanches surtout, dont le rapport est sexué.

Ces données de la taille, des segments plus importants que l'on pense, du poids, de l'éventuel périmètre crânien, etc., sont susceptibles d'affiner l'approche de la

détermination d'un « âge » ou mieux d'un pourcentage qui restera toujours probable, et non certain, si la date de naissance n'est pas connue avec certitude.

c- Les critères de maturation sexuelle :

Elles permettent parfois, par une évaluation descriptive et forcément partiellement subjective, de suggérer un « âge ». En fait, la seule réelle certitude réside dans l'affirmation d'un état pubère - couvert de poils dans les zones génitales - ou non (mentionnons la possibilité de rasage) [135].

Le problème reste cependant que ces repères ne correspondent pas à des âges absolus. L'âge moyen de la population d'individus qui affichent tous le même stade pubertaire est une valeur scientifique objective pour la population donnée, mais l'ET qui lui est associé est de plusieurs mois [53, 54].

Si le relevé de ces critères ne nécessite qu'un simple examen visuel de la part du médecin ; il n'en reste pas moins que c'est un examen souvent mal perçu par le jeune qui conçoit difficilement un examen quelque peu intrusif dans son intimité. D'autre part, il faut savoir que le repérage par l'examinateur de ces caractères sexuels secondaires tels que la pilosité par exemple est bien connue de certains jeunes délinquants. Il n'est pas rare de constater une épilation régulière – axillaire mais également pubienne et mentonnière – chez certains délinquants incarcérés en attente du passage de l'expert !! [53, 54]

Lorsque la possibilité d'un examen clinique convenable existe, sous un bon éclairage, on évaluera [135] :

- La pilosité sexuelle dans les régions péri-pénienne, périnéale (vulvaire) et péri-anale ;
- La pilosité axillaire et faciale est d'apparition très irrégulière dans sa chronologie et ses manifestations ;
- Le développement des seins est cité pour mémoire ;
- Le développement du testicule est malaisément jugé sur des photographies, de même que celui du scrotum ;
- La testométrie ou orchidométrie de Prader évalue le volume testiculaire et le compare à une « échelle d'âge » de 9 à 20 ans ; même si, la description est suffisante, on ne devrait pas considérer cette investigation « stigmatisante » si elle est menée avec discrétion, dans un local médical et avec beaucoup de sérénité. Il importe d'insister sur les conditions d'éclairage qui, si elles sont violentes, finissent par modifier profondément la pigmentation, y compris celle de la peau toute entière, et des éventuelles cicatrices.

d- Le comportement [135] **:**

C'est un indice mal commode, mais on peut constater sur le sujet : son inertie totale, voire sub-comateuse, si aucun de ses segments de membres ne change de place ; sa passivité apparente lorsqu'il supporte de multiples manipulations sans réagir expressivement ; et sa coopération ou tout au moins sa participation s'il produit des mouvements actifs.

V- L'EVALUATION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE ET L'ETHIQUE

L'évaluation de la maturation squelettique établie dans un but médical ou médico-légal, avec d'une part ses nécessités en moyens et en conditions et d'autre part son déroulement et ses résultats conduit à des **réflexions éthiques** qui cherchent à poser des questions sous forme de réserves éthiques et à fournir des réponses scientifiques.

Au-delà des problèmes éthiques soulevés par la validité des méthodes d'évaluation, une des questions majeures est celle en effet des conditions dans lesquelles sont réalisés les examens et la fiabilité des résultats.

Ci-dessous quatre questions éthiques et leurs réponses :

1- Le risque lié à l'irradiation radiologique :

Dans le cadre d'une maladie, on ne peut pas exagérer le risque pour la santé d'une irradiation radiologique ; les examens cliniques et/ou radiologiques effectués dans un but diagnostique et/ou thérapeutique d'une maladie, ne posent éthiquement le problème ni de leur indication, ni, pour les seconds, de la dose de rayonnement reçu, quand ils sont effectués selon les bonnes pratiques [52].

En revanche l'examen radiologique ordonné dans le but de statuer sur les conditions de minorité ou de majorité d'une personne, pour des raisons juridiques, repose la question de son légitimité. Si éthiquement il est conclu que l'examen radiologique est indispensable à l'expertise médicale dont ne pourra se passer le juge dans sa prise de décision, il doit alors être effectué après une information de la personne aussi éclairante que possible [52].

Le problème de la dose de rayonnement reçu ne peut être retenu dans ce contexte, puisque pour la détermination d'un « AO » il ne diffère pas sensiblement du rayonnement naturel [52], d'ailleurs, ce risque lié à l'irradiation radiologique est plus minime étant donné la situation du membre thoracique aisément isolable [132].

2- L'imprécision des techniques actuelles pour l'évaluation de la maturation osseuse :

La médecine utilise des critères non pas pour déterminer l'AC, mais pour apprécier l'âge biologique dans un contexte médical où seul l'âge « biologique » compte. Cette discordance entre AR et âge biologique est accrue par l'existence de plus d'un demi-siècle de changements morphologiques qui ont évolué de façon hétérogène selon les pays, et la détermination de l'âge d'un enfant ou adolescent reste, en l'état des connaissances et des techniques actuelles, une procédure qui comporte une part importante d'imprécision mal évaluée. Les adolescents, garçons et filles, peuvent être déclarés plus âgés qu'ils ne sont en réalité ou au contraire plus jeunes, par uniquement l'examen clinique de la puberté ; l'incertitude est plus grande entre 15 et 20 ans [52].

Les méthodes actuelles n'apportent pas aujourd'hui les informations scientifiques précises souhaitables, et pour atténuer cette imprécision, il faut procéder de plusieurs manières et par plusieurs moyens [35, 52, 131] :

a- Utiliser plusieurs méthodes pour affiner le résultat ;
b- Réaliser la procédure d'évaluation par des experts compétents ;
c- Estimer les résultats sous la forme d'une « fourchette large » ;
d- Faire un examen physique complet et couplé à la radiographie, comme suit :
   - Examen physique complet :
     - Critères anthropométriques ;
     - Développement pubertaire ;
     - Recherche de signes pathologiques du développement.
   - Examen dentaire avec OPT : par un dentiste ;
   - Imagerie :
     - Radiographie de la main et poignet gauche, en utilisant les méthodes de lecture connues (Atlas de GP, Sempé…) ;
     - Radiographie/TDM de la clavicule pour les âges élevés ;
     - Double lecture médicale (radio-pédiatre et endocrino-pédiatre).

Par ailleurs, la meilleure réponse éthique est de susciter de nouvelles recherches scientifiques pour :

a. A court terme, préciser la valeur réelle sur les populations diversifiées actuellement, des critères classiques autrefois établis sur un nombre restreint de sujets d'origines ethniques souvent homogènes et très largement différentes de celles des individus sur lesquels ces méthodes sont actuellement appliquées [81] ;
b. A plus long terme, tenter de savoir si l'élaboration de critères basés sur des indices aussi bien physiologiques, biologiques que de nature psychologiques permettant une appréciation la plus fine possible, est de l'ordre du possible [52], ce qui va permettre de développer des méthodes plus précises, plus exactes et fiables et si possible non exposantes, rapides, économiques et faciles à mettre en œuvre en tous lieux [81].

3- Respect, information et consentement du mineur (étranger, isolé) :

Les examens cliniques et/ou radiologiques ordonnés dans le but de statuer sur l'état de minorité ou de majorité d'une personne, pour des raisons juridiques, reposent fondamentalement la question de leur légitimité [52]. Il est indispensable que certaines conditions d'examen soient respectées :

- Pratiquer ces examens médicaux (inspection, mensurations, radiographies) après le consentement de la personne elle-même ou d'un tuteur ou d'une personne de référence. Ils ne peuvent être prescrits et réalisés que dans le respect attentif et l'accord de la personne qui se réclame du statut de mineur [52-54]. En effet, aucun critère ne peut être relevé par un médecin sous la contrainte [53, 54]. La soumission à des investigations radiologiques et à un regard clinique peut apparaître comme porteuse d'une certaine violence, si effectuées sans

consentement, et peut blesser la dignité des enfants ou adolescents soumis à un tel regard médical sans comprendre leur finalité, dans une structure hospitalière apparentée alors à une structure policière. l'examen radiologique en lui-même et surtout l'examen clinique, qui va comporter l'examen des organes génitaux externes, peuvent être perçus comme une agression, de même que d'éventuelles investigations biologiques nécessitant des prélèvements sanguins [52] ;

- Veiller à ce que les conditions dans lesquelles sont réalisés les examens soient les moins traumatisantes possibles pour des enfants, par des événements personnels ou familiaux pénibles, et qui, sans information adaptée à leur état, peuvent être inutilement choqués. il est essentiel de tout faire pour tenter d'expliquer les raisons qui conduisent à demander de tels examens [52] ;
- Disposer d'un temps d'examen correct, et non dans l'urgence [53, 54]. Le temps de parole doit être suffisant pour que le mineur éventuel puisse, dans une relation avec l'expert faite de confiance, d'ouverture d'esprit et de dialogue, et saisir les raisons de la demande d'examen [52] ;
- Disposer d'un laboratoire pouvant pratiquer en urgence un test de grossesse pour compléter éventuellement l'examen d'une jeune fille dont l'âge présumé se situe entre 13 et 16 ans [53] avant de faire pratiquer un examen radiologique [54] ;
- Respecter les droits et assurer la protection des mineurs [131] ;
- S'il s'agit d'un étranger, la présence d'un interprète est indispensable [35, 53, 54, 131]. En effet, le recours à une tierce personne, s'exprimant dans la langue de l'enfant, apparaît essentiel pour permettre d'atténuer la violence de telles situations [52] telle la violation de l'intimité [35, 52], voire obtenir de sa part des informations qui pourraient se révéler précieuses [52] ;
- S'il s'agit de délinquants, il faut connaître les différents alias sous lesquels le sujet a pu déjà être présenté à l'hôpital. Il n'est pas rare en effet de revoir de nombreuses fois le même sujet sous des noms différents. L'examen pourra alors être comparatif aux précédents, diminuant ainsi les causes d'erreurs [53, 54] ;
- S'il s'agit d'un demandeur d'asile, il sera nécessaire pour le médecin de recueillir des informations auprès des personnes qui ont pris en charge le mineur depuis son arrivée sur le territoire [53, 54].

En résumé, si éthiquement on conclut que l'examen radiologique et l'examen clinique sont indispensables à l'expertise médicale dont ne pourra se passer le juge dans sa prise de décision, ils devront alors être effectués après une information de la personne aussi éclairante que possible, si nécessaire grâce une tierce personne parlant sa langue, et selon une prise en charge préservant au maximum son intégrité physique et morale, et sa dignité [52].

4- « Détournement » des méthodes à but médical à des fins judiciaires :

Les différentes méthodes d'évaluation de la maturation squelettique utilisées ont été établies dans un but de diagnostic médical pour déceler différentes pathologies et non spécifiquement pour déterminer l'âge d'un individu [53, 54]. En effet, la finalité initiale des radiographies de la main et poignet gauches n'a jamais été juridique mais purement médicale, diagnostique et thérapeutique, pour le retard de la croissance et les traitements hormonaux, par exemple [52], et donc l'utilisation à des fins médico-légales de l'AO est très controversée et préoccupante et pose des problèmes d'ordre éthique [3, 52].

Plusieurs questions éthiques concernant l'utilisation sans discernement de paramètres médicaux scientifiques à des fins juridiques, se posent [52] :

- Peut-on se fier à des critères scientifiques qui ont une utilité et des objectifs purement médicaux, totalement indépendants de l'AC pour déterminer juridiquement un statut de mineur, lorsque des éléments d'identification sociale fiables manquent ?
- Comment l'expert médical peut-il donner une réponse autre qu'à une finalité purement médicale ?
- Comment le juge peut-il alors utiliser une expertise « détournée » de sa finalité scientifique initiale ?
- Quelle attitude peut-il avoir face à une absence de certitudes ?
- Que peut faire le juge d'une information dont la médecine dit qu'elle ne peut avoir de signification en termes juridiques ?

La médecine utilise en effet des critères non pas pour déterminer l'AC, mais pour apprécier l'âge biologique dans un contexte médical où seul l'âge « biologique » compte. Ces paramètres d'ailleurs, comportent une part d'imprécision mal évaluée. Certes, l'écart entre les données médicales, toujours relativement simples à interpréter, et la détermination à des fins juridiques de l'âge, est considérable, mais cette incertitude et cet écart ne signifient pas qu'il faille renoncer à l'expertise en tant que telle, dans la mesure où la loi exige qu'elle soit diligentée, mais imposent d'y avoir recours dans des conditions et des principes qui permettent relativement la portée des conclusions [52] :

- Le statut de l'expert médical est partagé entre deux finalités. Celle de médecin qui permet une réponse quantifiée accompagnée d'une marge d'erreur, destinée ou non à permettre une intervention thérapeutique, et celle d'expert juridique qui implique une réponse plus qualitative et très imprécise exprimant une considérable marge d'incertitude et qui doit prendre en compte d'autres composantes de la personne examinée. Et face à l'écart considérable entre les données médicales, toujours relativement simples à interpréter, et la détermination à des fins juridiques de l'âge, cette situation d'inadaptation de l'expertise médicale à la situation réelle met le point sur le statut ambigu de cette forme d'expertise, et du statut de l' « expert » médical dans un tel contexte. Et

donc le médecin expert doit exprimer au juge l'insuffisance des données de la science en ce domaine, laissant ainsi entendre au juge qu'il devra faire appel à d'autres données pour asseoir sa décision. Il conviendrait notamment d'attribuer un poids plus important aux comportements, face à l'AC ;

- La justice doit prendre en compte la discordance fréquente entre l'âge biologique (ou physiologique) et l'âge juridique ;
- Il conviendrait de privilégier l'attention à des comportements que d'assimiler un AR à des caractéristiques corporelles. La seule connaissance d'un âge légal ne permet pas en soi de juger du degré d'autonomie et de responsabilité d'une personne ;
- Le juge ne doit pas prendre la valeur médiane de la « fourchette d'âge », ce qui aboutirait de fait à donner un résultat faussement précis ; dans le doute, le juge ne devrait s'en remettre qu'aux éléments les plus favorables à l'enfant ou à l'adolescent.

Malgré ça, et face à cette situation d'inadaptation de l'expertise médicale à la situation réelle, la responsabilité du juge est entière dans la mesure où les arguments médicaux ne pourront lui apporter d'éléments suffisamment certains pour asseoir sa conviction [52].

5- Conclusion et recommandations

L'âge d'un adolescent ne se réduit jamais à une image, une mensuration ou une manifestation d'un développement pubertaire. En revanche, il est vraisemblable que l'on peut cerner plus facilement un statut de mineur en croisant des données psychologiques, sociales, culturelles, justifiant l'aspect collectif et pluridisciplinaire qu'elle devra être l'expertise. Le corps médical ne doit donc pas s'exclure de ses responsabilités, mais intervenir avec le plus de discernement possible en prenant en compte la complexité même de la situation. C'est précisément cette complexité qui rend de plus en plus difficile, en l'absence de données identifiantes, la fixation purement juridique d'un âge. La difficulté repose sur le fait que la loi doit respecter les droits fondamentaux et que la valeur d'âge est un critère bien fragile pour pratiquer ces droits [52].

CHAPITRE I :
DÉVELOPPEMENTS EMBRYONNAIRE ET MATURATIF DU SQUELETTE OSSEUX APPENDICULAIRE

« La maturation squelettique est la transformation d'un modèle cartilagineux pour aboutir à l'achèvement d'un processus métabolique osseux complexe. La maturation squelettique a un terme obligé qui est celui de la maturité osseuse adulte ».

Professeur Michel SEMPÉ
Auxologie et maturation squelettique, 2013

I.1. Le squelette osseux appendiculaire : le substratum de l'évaluation de la maturation osseuse

I.2. Le développement embryonnaire normal du squelette appendiculaire (au membre thoracique) chez l'homme

I.3. Le développement maturatif normal du squelette appendiculaire chez l'enfant et de l'adolescent

I.4. Les facteurs influençant la maturation osseuse

I.1. Le squelette osseux appendiculaire : le substratum de l'évaluation de la maturation osseuse

Le squelette appendiculaire est constitué par les ceintures scapulaire et pelvienne et les os des membres [96, 117].

Mis à part le crâne et la face dont la radiographie peut servir pour la détermination de l'âge dentaire, mise à part également la colonne vertébrale dont l'analyse séquentielle complète de la maturation n'a pas été encore réalisée (pour son analyse en orthopédie) [139], ce sont donc toutes les articulations des membres qui ont été prioritairement mises à contribution pour évaluer la maturation osseuse [137, 139].

Par ailleurs, et après la 14ème année, le développement des dents donne quelques indices pour déterminer l'âge de non-adultes. Mais le critère le plus important est la synostose de l'épiphyse et de la diaphyse des os longs. De même l'ossification du pelvis, de la scapula, du sternum, du sacrum et des phalanges peut donner des indications [63]. Après l'ossification, des vestiges de la fusion de la diaphyse avec l'épiphyse paraîtront encore pendant un ou deux ans sous forme de lignes plus claires. La disparition de celles-ci indique ensuite le passage à l'âge adulte [63].

1- L'ostéogénèse... la formation de l'os

L'ostéogénèse n'est pas, au sens strict du mot, un processus de croissance mais, au contraire, exclut éventuellement la croissance car, dès que le cartilage a fait place à de l'os solide et permanent, la possibilité de croissance physiologique est totalement terminée [139].

Tout os commence par une prolifération mésenchymateuse précoce au cours de la période embryonnaire [69]. Bien que les os de membrane (clavicule, mandibule, certains os du crâne) [69] subissent une ossification membraneuse [96, 117, 120], et croissent uniquement par apposition, c'est-à-dire par l'adjonction de nouvelles couches d'os sur les faces libres, la plupart des os subissent une ossification enchondrale. Le modèle mésenchymateux se transforme en cartilage hyalin selon la forme du futur os, ce cartilage est ensuite remplacé par de l'os [67].

L'ostéogénèse se caractérise par deux aspects, un préalable diaphysaire et une limitation épiphysaire, éléments importants à toute maturation [137, 139] :

- Le préalable diaphysaire, est lié à la chondrogénèse générale qui, dès l'embryogénèse, s'est localisée dans les futurs segments de membres au niveau des diaphyses des os longs et courts permettant à la fois leur allongement et leur épaississement circulaire par apposition osseuse successive : ceci se termine in utero sauf pour quelques rares secteurs distaux des orteils ;
- La limitation épiphysaire, va de pair pour permettre le jeu des articulations fonctionnelles très tôt : il s'agit d'une chondrogénèse physaire qui doit conserver ses potentialités durant une vingtaine d'années parfois.

2- La maturation osseuse… l'âge de l'os

La maturation est l'ensemble des changements qualitatifs, apparents ou découlant d'investigations variées, que présente une personne humaine tout au long cours de son infance (petite enfance), de son enfance et de son adolescence, depuis la conception jusqu'à l'âge adulte où elle atteint sa maturité [132].

Le mot « maturation » prend ici, un autre sens plus particulier : la maturation osseuse. Celle-ci est examinée et suivie au cours de son évolution au niveau de la main et du poignet, régions dont les aspects anatomiques et fonctionnels successifs permettent d'apporter des conclusions particulièrement fécondes. Au poignet et à la main, en effet, les points d'ossification sont nombreux, quarante-cinq environ, ils apparaissent non dans un ordre quelconque mais dans un ordre et à une date qui leur semblent imposés. Ils se soudent dans un ordre donné. Chaque point d'ossification s'inscrit, en effet, sur le calendrier de la vie du sujet à une date donnée, il annonce l'heure de l'accomplissement d'un stade biologique : c'est un indicateur [139]. L'os est considéré alors, comme étant un bon marqueur biologique [67], et l'évaluation de la maturation squelettique puisse se faire sur l'ensemble du squelette [23].

En effet, la structure histologique d'une pièce squelettique est indépendante de sa forme. Il y a deux phénomènes histologiques différents : la morphogénèse et la maturation tissulaire. La transformation du mésenchyme en cartilage, puis du cartilage en os, peut se faire plus tôt ou plus tard, mais elle n'influe sur la forme externe de la pièce que par la différence d'âge de l'embryon [112]. En fait, par le biais de la clavicule fœtale, il est montré que la croissance longitudinale des os longs est du même type que la croissance longitudinale du corps humain, ce qui nous a permis de « dater » les embryons, de leur donner un « âge probable » quand nous n'en connaissions que la taille [112].

Dans une étude de croissance, il existe deux possibilités de faire intervenir le temps [112] : soit directement, en exprimant la croissance en fonction de l'âge, et en cherchant une relation explicite ; Soit indirectement, en rapportant les segments du corps à une longueur commune, la taille par exemple.

Chez les morphologistes, l'âge est considéré comme un caractère intrinsèque de l'être au même titre que les dimensions usuelles (longueur, épaisseur, etc…), et non pas un milieu extérieur dans lequel se développe l'individu [112].

Par principe, toute dimension doit être exprimée en fonction du temps, pris comme variable indépendante, et la réalité sera atteindre par « la conjugaison de l'espace et du temps » comme disait le philosophe français Henri Bergson (1859-1941) [112].

Suivant les êtres, le temps n'est exactement le même, il s'écoule plus ou moins vite et il y a des croissances et des maturations différentes d'un sujet à l'autre [112].

Le squelette d'un enfant en bonne santé est un ensemble qui se développe de façon harmonieuse [69]. L'étude des phénomènes de développement du squelette est des plus instructives pour étayer un diagnostic sur le degré d'évolution corporel d'un

enfant. Depuis les premières semaines du développement fœtal jusqu'à la maturation définitive, le squelette passe lentement d'un stade cartilagineux a un stade osseux. Ce changement se fait d'après des lois assez fixes pour que l'on puisse porter un diagnostic de l'âge probable de l'individu d'après la plus ou moins grande partie de squelette déjà calcifiée. Ce diagnostic ne s'est pas imposé immédiatement et il a fallu de nombreux travaux avant de dégager les critères de maturation osseuse [139].

Par ailleurs, il importe d'inclure toutes les variations physiologiques propres à chaque sexe puisqu'il est amplement prouvé que la maturation osseuse des filles précède toujours celle des garçons, non seulement dès la naissance et lors de la puberté, mais aussi dès les premiers développements des « points » d'ossification diaphysaire in utero. En plus, chaque os ou épiphyse n'a pas la même dispersion statistique que ce soit dans l'ordre absolu de leur date d'apparition, que ce soit dans leurs relations réciproques ou que ce soit dans leur alternance de visibilité [139].

3- L'ostéogénèse et la maturation osseuse : deux faces d'une même pièce

L'ostéogénèse du cartilage, considérée comme une maturation, est maintenant largement acceptée. Ainsi, quand nous considérons la maturation du squelette dans ce sens, nous donnons une précision étroitement scientifique à un vieux mot [139].

L'étude radiologique de la croissance et du développement commencera d'abord par l'analyse de la maturation squelettique considérée comme une ossification séquentielle étroitement déterminée dans sa dynamique [137].

Il faut donc définir une échelle, un étalonnage qui s'accorde avec la lenteur de l'ostéogénèse et permette une progression cohérente durant les seize à vingt-deux années pendant lesquelles elle se manifeste [139].

En fait, la maturation du squelette appendiculaire s'effectue en trois stades : prénatal, postnatal de l'enfance et postnatal de l'adolescence [4] : L'effort de clarté devra porter sur la période intermédiaire de l'ostéogénèse, après la naissance, car l'emploi de la radiographie chez le fœtus ne saurait être conseillé [137, 139].

a. <u>La maturation prénatale :</u> se caractérise par l'ossification des maquettes cartilagineuses diaphysaires des os longs [4, 96]. Le début de cette maturation remonte à la 4ème [101] ou la 5ème [96] semaine de la vie intra-utérine (IU) quand les ébauches des membres bourgeonnent [96, 101] puis croîtrent et se différencient vers la 6ème semaine [96], et à la fin de la 8ème semaine, tous les constituants des quatre membres sont identifiables [101].

   Pendant toute cette période, les éléments squelettiques des membres se constituent à partir d'une condensation mésodermique le long de l'axe du bourgeon du membre, dont sa chondrification fait apparaître les maquettes cartilagineuses vers la 6ème semaine, puis subissent une ossification enchondrale [96, 101] entre la 8ème et la 12ème semaine et ce pour tous les os des ceintures et des membres à l'exception de la clavicule qui subit une ossification membraneuse [101]. Cette ossification fait différencier le

périoste, les reliefs et le canal médullaire [96]. Pour les os long, le processus d'ossification débute au centre d'ossification primaire [96, 101] qui est diaphysaire, l'ossification progresse par la suite vers les extrémités [96].

b. La maturation de l'enfance : se caractérise par l'ossification des petits os du tarse et du carpe et les épiphyses des os longs [4, 96]. En effet, à la naissance, la diaphyse est ossifiée, les deux épiphyses, jusqu'ici cartilagineuses, font apparaître des centres d'ossification enchondrale secondaires qui s'ossifient progressivement [96, 101]. Entre les deux centres, diaphysaire et épiphysaire, persiste une plaque cartilagineuse permettant la croissance en longueur de l'os, c'est le cartilage de conjugaison ou de croissance [96, 101].
c. La maturation de l'adolescence : se caractérise par l'ossification des cartilages de croissance [4, 96]. Lorsque l'os atteint sa longueur définitive, les épiphyses s'unissent avec la diaphyse [96, 101], cette fusion est achevée à l'âge adulte, en moyenne à 18 ans pour les filles et à 19 ans pour les garçons [86].

En parallèle, La transformation osseuse est seule cliniquement intéressante pour juger de la maturation ; au niveau des os courts et des épiphyses des os longs, cette ossification a la particularité de débuter (sauf au pied) avec la vie postnatale : elle cumule trois phases ostéogénétiques imbriquées les unes dans les autres et qu'il convient de dissocier pour procéder à leur analyse discriminante [137, 139] :

i. Cette ostéogénèse est d'abord initiale, où un dépôt princeps de molécules calciques au débouché de l'artériole nourricière de l'osselet ou de l'épiphyse ; seule l'apparition des premières molécules contenant du calcium témoigne du processus engagé en arrêtant ou déviant légèrement les rayons X : tous les indicateurs initiaux de chacun des os et épiphyses sont « fantômatiques », flous, à la limite de la visibilité pour un observateur entraîné, c'est le seul signe radiographique décelable sous l'intitulé « apparition » ;
ii. L'ostéogénèse secondaire, rassemble les processus structurant l'accumulation du matériel calcifié : une trame se fait jour, les limites corticale et médullaire peuvent évoluer, les tracés projetés sur le plan des films seront plus ou moins réguliers, etc. Cette phase va se poursuivre jusqu'à la puberté en faisant parfois intervenir des mouvements d'ensemble ou l'efflorescence d'indicateurs communs à certains groupes d'os ou d'épiphyses ;
iii. L'ostéogénèse terminale, envahit les cartilages de conjugaison, détruit la ligne physaire et entraine une fusion définitive épiphyso-diaphysaire ce qui est corrélé avec l'arrêt de la croissance en longueur. Il faut admettre toutefois que l'élongation peut être également en partie diaphysaire. En ce qui concerne les os courts, il y a des assemblages, mais rien d'autre qui puisse être facilement décrit : chacun a sa fonction, donc sa forme qui lui est propre. Cette phase tertiaire met en place les systèmes de contention destinés à bloquer l'ostéogénèse dans ses confins physiologiques et fonctionnels.

I.2. Développement embryonnaire normal du squelette appendiculaire (au membre thoracique) chez l'Homme

Les membres apparaissent sous la forme de bourgeons surélevés au niveau des faces latérales de l'embryon [19, 117]. Pendant la 6ème semaine du développement embryonnaire et dans le mésenchyme des bourgeons des membres apparaissent des centres de chondrification [90, 117]. Ces centres, entourés de périchondre, forment les matrices cartilagineuses de chaque os. Dans ces matrices cartilagineuses, apparaissent les points d'ossification primaires, puis les points d'ossification secondaires [90].

1. Les débuts…

La maturation prénatale se caractérise par l'ossification des maquettes cartilagineuses diaphysaires des os longs [4, 95].

Le début de cette maturation remonte à la 4ème [96] ou la 5ème semaine IU [95] quand les ébauches des membres bourgeonnent [95, 96] puis croissent et se différencient vers la 6ème semaine [95] ; à la fin de la 8ème semaine, tous les constituants des quatre membres sont identifiables [96].

Pendant toute cette période, les éléments squelettiques des membres se constituent à partir d'une condensation mésodermique le long de l'axe du bourgeon de membre, dont sa chondrification fait apparaître les matrices ou maquettes cartilagineuses vers la 6ème semaine, puis subissent une ossification enchondrale [95, 96] entre la 8ème et la 12ème semaine [96] et ce pour tous les os des ceintures et des membres à l'exception de la clavicule qui subira une ossification membraneuse [96].

Pour les os long, le processus d'ossification primaire débute au centre diaphysaire [95, 96], l'ossification progresse par la suite vers les extrémités [95], où se passe l'ossification secondaire.

Dès le 35ème ou 40ème jour IU, et sur une durée de 20 jours [112], se forme le squelette appendiculaire [90, 112, 117]. Au 60ème jour de fécondation, tout le squelette appendiculaire humain est formé. Ensuite n'interviennent plus que la croissance et la différenciation histologique [112]. Tous ces processus de croissance se font sous influences hormonales [120].

Le « jour » en embryologie est un fait important et chargé, ce sont des jours très longs [112]. En effet, les dates en embryologie correspondent seulement à des approximations, à des valeurs probables, destinées à fixer les idées et à montrer la précocité et la rapidité de formation du squelette appendiculaire. A ce moment, il se passe beaucoup de choses en peu de jours, le temps biologique s'écoule très lentement, les jours sont très longs [113].

De façon générale, les classiques gradients de croissance, « cranio-caudal » et « proximo-distal », se retrouvent aisément : le membre thoracique se forme avant le membre pelvien, la main apparaît avant le pied, l'avant-bras avant la jambe, etc... Cependant, les ceintures ne paraissent pas avoir d'antériorité par rapport au squelette des membres proprement dit, au contraire. L'apparition des os de l'avant-bras et de la jambe (zeugopode) est contemporaine de celles de l'humérus et du fémur (stylopode). Au niveau des extrémités distales, il semble y avoir aussi une croissance allant de l'axe médian à la périphérie (gradient en éventail) [113].

2. Formation des bourgeons du membre thoracique

Vers la fin de la 4ème semaine IU [69, 90, 117] ou au début de la 5ème semaine IU [95] (embryon de 5 mm [69]) naissent les ébauches des quatre membres [95, 96, 117], sur les parois latérales de l'embryon [90], sous forme de bourgeons [19, 69, 95] en palette [19, 95].

Ces bourgeons se développent en s'allongeant dans le sens proximo-distal, c.-à-d. en direction caudale puis ventrale [19, 69], avec un décalage d'apparition de deux jours de différence entre le membre thoracique qui précède le pelvien [69, 90]. Les bourgeons des membres thoraciques apparaissent à la partie inférieure de la région cervicale [96, 117], au 24ème jour IU [96, 117, 144] (quelque fois entre le 26ème et le 30ème jour, ce qui correspond au stade 12 de Carnegie [19]).

Les bourgeons se forment et se développent par une série d'inductions réciproques du mésoderme et de l'ectoderme [19, 95, 96, 117].

Primitivement, le mésoderme latéral de la somatopleure induit un épaississement épiblastique longitudinal transitoire, c'est la crête de Wolff qui disparait au milieu et persiste sur ses deux extrémités au niveau des futures ceintures [117, 144] sous forme de « calottes » donnant les bourgeons [144]. Chaque bourgeon est constitué d'un axe mésodermique (mésenchymateux) qui dérive de la somatopleure [95, 96, 117], et recouvert d'un feuillet ectodermique [90, 95, 117] qui se différencie et s'épaissit à l'apex du bourgeon [90, 95, 96], sous l'induction de l'axe mésodermique [96]. Ce feuillet ectodermique forme une coiffe ectodermique externe [96] appelée la crête ectodermique apicale (CEA) qui a une action inductive sur le mésoderme sous-jacent [19, 90, 95, 96, 117] responsable de la croissance proximo-distale du membre [96] par vagues successives [117].

En revanche, le mésoderme sous-jacent à la CEA, et par induction de cette dernière, va se différencier [95, 96] en se condensant en sclérotome et myotome [144], ce qui va déterminer les segments du membre sur la base de son âge, c.à.d. le mésenchyme qui s'est constitué le premier à la racine du bourgeon, est à l'origine des segments proximaux, celui qui est mis en place en dernier lieu à la pointe du bourgeon, donne les segments distaux du membre [96].

Il est bon de rappeler que le bourgeon de membre thoracique ne contient tout d'abord que la partie distale du squelette primitif, et le segment proximal,

l'humérus primitif, se trouve donc sous la peau du corps, ultérieurement il pénètre le bourgeon comme un doigt dans un gant [112].

3. Formation des segments du membre thoracique

Le développement des bourgeons des membres s'étale sur quatre semaines, de la 5ème à la 8ème [96], marqué par une légère avance des deux membres thoraciques par rapport aux pelviens [95, 96, 112, 117, 144] par manifestation du gradient cranio-caudal de croissance [112], ce décalage persiste tout au long du développement [95, 112]. En plus, le segment distal d'un membre croît plus vite que le segment proximal, le membre thoracique apparaît plus tôt et croît ensuite plus lent que le membre pelvien : c'est la croissance différentielle (allométrique) [112].

Au 33ème jour (stade 14 de Carnegie, 5-7 mm) **:** les segments du membre thoracique sont reconnaissables : épaule, bras, avant-bras et palette de la main [19, 96, 117, 144].

Au cours de la 5ème semaine (35J : stade 15 de Carnegie, 7-9 mm) **:** les plis du membre (coude et poignet) se dessinent ; le coude croît en direction caudale. Aussi, les lames primitives des mains présentent les sillons digitaux qui, en se résorbant, isolent les doigts [90].

A partir de 38ème jour [95] (stade 16 de Carnegie, 8-11 mm) : la palette de la main, qui s'est formée par aplatissement de l'extrémité distale du bourgeon [95, 117], est séparée du segment proximal par un sillon circulaire [95]. Cette palette va se différencie en deux zones, l'une centrale formant la région carpienne entourée par un bourrelet épais appelé la plaque digitale [96], cette dernière va présenter des épaississements radiaires à l'origine des rayons digitaux : c'est par un processus progressive de mort cellulaire programmée que ces rayons digitaux « se sculptent » pour former les doigts [19, 95, 96]. La main apparaît à 41 jours [112] (stade 17 de Carnegie, 11-14 mm).

Parallèlement à l'évolution des palettes des mains [95], un deuxième sillon de constriction transversale divise le segment proximal en deux portions, et le membre possèdera alors ses trois segments définitifs [95, 117, 144].

Au cours de la 7ème semaine (stades 18, 19 et 20 de Carnegie, 18-22 mm) **:** les rotations axiales des membres se produisent ; le membre thoracique subit une rotation latérale de 90° [90].

Au 52ème jour (stade 22 de Carnegie, 23-28 mm) : les membres thoraciques sont légèrement fléchis au niveau des coudes et des poignets, les coussinets tactiles des doigts apparaissent sous forme de renflements distaux [96].

Au 56ème jour (stade 23 de Carnegie, 27-31 mm) : tous les segments des membres thoraciques sont bien isolés [96].

4. Formation des os du membre thoracique

Les os des membres dérivent du mésoderme de la lame latérale [96].

De tous les os du membre thoracique, la clavicule, os de membrane, fait exception [69, 90, 96, 112, 117, 120], elle se développe par ossification directe du

mésenchyme situé dans le derme [96] appelée ossification membraneuse [69, 90, 96, 117, 120] ou endoconjonctive [120].

Les autres os des membres et des ceintures se forment par ossification d'une ébauche cartilagineuse, ce processus est connu sous le nom d'ossification enchondrale [69, 95, 96, 120], ou endochondrale [69], où un tissu cartilagineux donne lieu à un tissu osseux.

Cette ossification enchondrale est due à une condensation « en bâton » du mésenchyme [95, 96] de la lame latérale occupant le grand axe du bourgeon du membre [96], et à une différenciation des cellules mésoblastiques qui deviennent des chondroblastes [95].

Ces condensations apparaissent dès la 5ème semaine pour le membre thoracique, suivis de chondrification des ébauches condensées qui commence à la 6ème semaine pour le membre thoracique, et se termine à la 8ème semaine [19], enfin l'ossification de la plupart des ébauches des membres ainsi chondrifiées apparaissent entre la 7ème et la 12ème semaine [96].

a. **La condensation** du mésenchyme axial des bourgeons des membres commence au cours de la 5ème semaine, marquée par un léger décalage dans le temps entre les deux membres thoracique et pelvien [96]. Cette condensation se développe dans le sens proximo-distal tout le long du membre [112] : à la fin de la 5ème semaine, la portion condensée du mésenchyme axial qui est à l'origine du squelette proximal du membre (scapula, humérus) est bien distincte, et au début de la 6ème semaine, la portion condensée du mésenchyme axial qui est à l'origine du squelette distal du membre (ulna, radius) est individualisée [96].
b. **La chondrification** débute vers la 6ème semaine du développement [90, 95], elle consiste en un dépôt de cartilage autour de l'ensemble de l'axe mésenchymateux [96] formant les centres de chondrification qui définissent les matrices cartilagineuses de chaque os [90] ; ils seront entourés d'une enveloppe cartilagineuse [96] appelée le périchondre [90, 95, 96], qui se différencie en périoste [95, 112]. A la base de chaque bourgeon existent deux centres de chondrification, ventral et dorsal : des centres ventraux naissent le processus coracoïde et le tubercule supraglénoïdal du membre thoracique ; des centres dorsaux naissent le reste de la scapula [90].

   Ultérieurement, cette chondrification se limite aux sites des futurs os où elle est responsable de l'apparition d'un « modèle » cartilagineux de chaque os [96].

   Au début de la 6ème semaine : la chondrification au niveau de l'humérus, de l'ulna et du radius s'installe [96].

   Il y a donc, aux 2 membres, un ordre de chondrification : humérus, puis radius, puis ulna [112].

A la fin de la 6ème semaine : le carpe et les métacarpiens subissent leur chondrification [96].

Au début de la 7ème semaine : tous les os du membre thoracique (sauf les phalanges distales des doigts II à V) sont en voie de chondrification [96].

A la fin de la 7ème semaine : les phalanges distales des doigts entament la chondrification [96].

c. **L'ossification** du « modèle » cartilagineux apparait au niveau des régions appelées les centres (ou noyaux ou points) d'ossification [90, 91, 95, 96, 125] qui sont des points de départ de l'ossification d'un os ; on distingue, en fonction de leur apparition chronologique au cours de développement, deux types [91] :

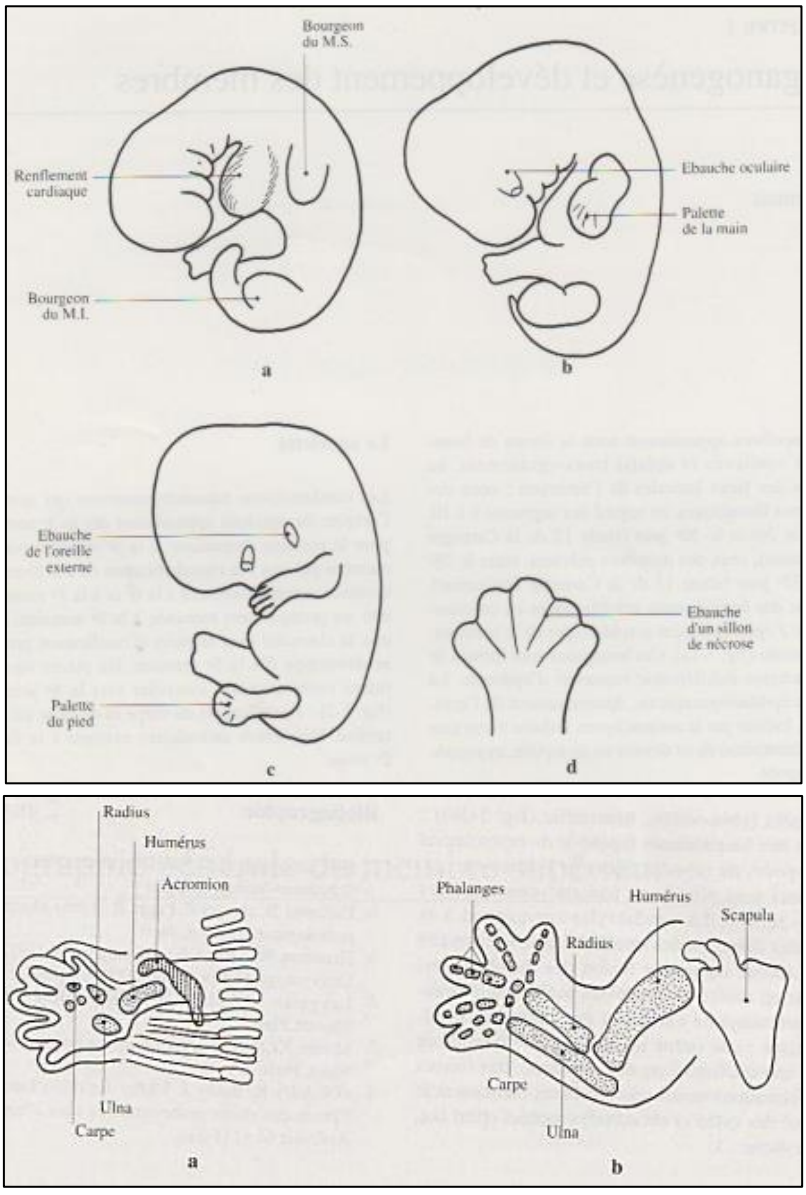


Figure 12 bis : Le développement embryonnaire du membre thoracique [19]

En haut : (a) Embryon de 5 semaines ; (b) Fin de la 5ème semaine ; (c) Fin de la 6ème semaine

En bas : (a) Embryon de 11 mm ; (b) Embryon de 20 mm

- **Le centre d'ossification primaire (ou primitif)** [90, 91, 95, 96, 125], qui est le premier point d'ossification qui se forme au cours du développement du squelette [125] et le point de départ initial de l'ossification de l'os endochondral, il donne la majeure partie de l'os [91], et il est situé, pour les os longs, dans la diaphyse [91, 95] puis s'étend graduellement vers les extrémités de l'ébauche [95, 96]. A la naissance, les diaphyses des os des membres sont complètement ossifiées, alors que les épiphyses sont encore cartilagineuses [95, 96].
- **Le centre d'ossification secondaire (ou complémentaire** [125]**)** [90, 91, 95, 96, 120, 125], qui apparaît après le point primaire et à des âges variés de la vie postnatale [91, 95], il se développe dans les épiphyses qui s'ossifient progressivement à leur tour [91, 95, 96, 120, 125] ou dans des structures secondaires de l'os, tel un processus [91].

Cependant, persiste entre l'épiphyse et la métaphyse (extrémité en croissance active de la diaphyse), une bande de cartilage appelée le cartilage de croissance ou de conjugaison, permettant la croissance en longueur des os [95, 96, 120]. Ces cartilages de conjugaison disparaissent à l'âge adulte, quand la croissance du corps s'achève et les os atteignent leur longueur définitive, par conséquent, les épiphyses et les diaphyses fusionnent [95, 96].

5. Aspects évolutifs des os embryonnaires du squelette du membre thoracique

N.B. : nous allons nous limiter à la description du développement embryonnaire du membre thoracique, car c'est notre objet d'étude.

a. Clavicule :

La clavicule embryonnaire est massive, rectiligne, presqu'antéro-postérieure [112, 113], et elle se modifiera ensuite, à mesure que les muscles prennent leurs insertions, que l'épaule se déjette en dehors et surtout que le thorax perd sa forme arrondie primitive, pour devenir transversal [113].

La clavicule se développe à partir de deux noyaux, non seulement cartilagineux mais aussi mésenchymateux ; elle n'est pas franchement un os de membrane, mais un os qui dérive, au moins en partie, d'un cartilage particulier [112] : l'ossification se fait par ostéogénèse membraneuse, non précédée d'un stade cartilagineux [69].

b. Scapula :

Elle est d'emblée aplatie, présente une épaisseur plus grande que chez l'adulte [112], à siège primitif cervical [112, 113], très haut situé comme les racines du plexus brachial [113]. Le processus coracoïde est d'abord à distance, accolé contre la tête humérale [112, 113]. L'épine se réduit d'abord à son bord latéral ; celui-ci forme une sorte de console qui soutient l'acromion, ou est destiné à le soutenir, car il apparaît avant. La forme de la scapula et l'orientation de la future cavité glénoïdale annoncent la forme humaine. Il n'en est pas de même

de l'orientation de l'os dans l'espace : chez l'embryon la scapula est plaqué à la partie latérale du thorax, comme chez les Singes [113].

c. Humérus :

D'abord massif, court et trapu, avec de volumineuses extrémités donnant à l'os une forme « en haltère » [112]. Situé d'abord en avant de la scapula, sous la peau du cou de l'embryon [112, 113], il est presque horizontal 113 ensuite il s'abaisse et se verticalise progressivement [112, 113].

L'humérus primitif subit pendant son évolution une « torsion » : l'épiphyse proximale regarde en arrière et un peu en haut puis finalement la tête va regarder surtout en dedans, il faut donc qu'elle se torde sur son axe ; ce mouvement de rotation, pour les anciens auteurs, paraissait certain puisque l'orientation de la tête humérale se modifie progressivement en période embryonnaire, fœtale et de la petite enfance [112]. Le transfert de l'épaule plus latéralement et la rotation du plan de la scapula suffisent à expliquer le changement d'orientation de la tête humérale [113]. Une preuve donnée est l'enroulement du nerf radial autour de la diaphyse et l'existence du sillon du nerf radial, dit : gouttière « de torsion » [112]. Par contre, on peut soupçonner une torsion de l'épiphyse distale, qui se déploie peu à peu vers le bas et vers l'arrière ; le radius ne s'implante pas sous cette épiphyse, mais en avant [113].

d. Os de l'avant-bras :

Radius et ulna dérivent d'une plaque mésenchymateuse qui s'est condensée autour des futurs vaisseaux interosseux, et la perforation de cette plaque par ces vaisseaux ébauche l'espace interosseux. Les os s'isolent rapidement et divergent vers le bas où ils sont fortement écartés, comme les os de la jambe au même stade [113] :

- **Le radius** est d'abord massif, court et trapu, qui s'implante en avant de l'épiphyse distale de l'humérus et non au-dessous d'elle [112]. L'élargissement de l'épiphyse distale est tardif [112, 113]. La forme en sablier de la diaphyse se retrouve partiellement ici, son épiphyse distale s'élargit [112].
- **L'ulna** est d'abord massive, courte et trapue. L'épiphyse distale est d'emblée large [112]. Le crochet olécrânien est très volumineux et s'articule de biais avec la trochlée humérale, comme s'il y avait ensuite une rotation latérale de 45° autour de l'axe de l'ulna [112, 113], amenant en même temps l'épiphyse proximale du radius en position normale [113].On sait, car cela est classique, que le coude est situé en dehors et en avant, dans la position du nageur de brasse. L'olécrâne évoluera donc d'une position latérale à une position postérieure, effectuant une rotation de 90°, qui semble partagée entre l'humérus et l'avant-bras. L'épiphyse distale de l'ulna est large d'emblée, elle présente de plus une importante articulation avec le carpe : son processus styloïde se loge

entre le triquétrum et le pisiforme. C'est là une disposition primitive, qui se perd au cours de l'ontogénèse humaine et permet la souplesse de la main [113].

e. Os de la main :

La main embryonnaire présente des dispositions très intéressantes. Elle est d'abord très volumineuse et très large, composée de rayons très divergents, au nombre de trois, puis de cinq. Sa formation se fait dans le sens proximo-distal, puis en éventail à partir de l'axe médian. Elle est surtout en rapport avec l'ulna, et c'est secondairement qu'elle passe en grande partie sous le radius [112, 113].

La première ébauche du membre thoracique apparaît à partir d'un bourgeon visible, dès le 24ème jour. Trois jours après l'apparition de l'ébauche du membre thoracique, vont s'individualiser les noyaux mésenchymateux à l'origine des os du carpe. Cinq jours plus tard, la main est déjà bien formée et la chondrification de ces noyaux va débuter. L'ossification ne commencera qu'à la naissance.

Le pouce est toujours petit, et ne comprend qu'un métacarpien et deux phalanges [112, 113].

Le pisiforme est relativement volumineux et homologue de la tubérosité postéro-latérale du calcanéus [112, 113], c'est « le talon de la main » [113] ; ce n'est donc pas l'équivalent d'un sésamoïde [112, 113].

L'os central du carpe, bien individualisé, fournit un bel exemple d'hétérochronie évolutive, par sa fusion rapide avec la partie distale du scaphoïde chez l'Homme [112, 113].

De façon générale, le carpe chondrifie entre les 44ème et 48ème jours, à l'exception du pisiforme qui chondrifie vers le 50ème jour. L'ordre d'apparition des noyaux cartilagineux pour le carpe est le suivant [20] :

- stade 1 : os hamatum, capitatum 42,5 à 45 jours ;
- stade 3 : trapézoïde 44 à 47 jours ;
- stade 5 : triquétrum trapèze 44 à 49 jours ;
- stade 6 : os radial et os central 40 à 50 jours ;
- stade 8 : lunatum 47,5 à 55 jours ;
- stade 11 : pisiforme 50 à 52 jours.

I. 3. Le développement maturatif normal du squelette appendiculaire chez l'enfant et l'adolescent :

La maturation postnatale se distingue en deux tranches d'âge, à l'enfance et à l'adolescence…

La maturation postnatale de l'enfance se caractérise par l'ossification des épiphyses des os longs des membres, des petits os du carpe et du tarse et des sésamoïdes [4, 69, 95].

En effet, à la naissance, la diaphyse est habituellement ossifiée ; les deux épiphyses, jusqu'ici cartilagineuses, font apparaître des centres d'ossification enchondrale secondaires qui s'ossifient progressivement. Entre les deux centres, diaphysaire et épiphysaire, persiste une plaque cartilagineuse permettant la croissance en longueur de l'os, c'est le cartilage de conjugaison ou de croissance [95, 96]. Dans beaucoup d'os jeunes, les parties non calcifiées des épiphyses peuvent se voir sous forme de bandes radio-transparentes irrégulières, dites lignes épiphysaires [69]. L'enfant est une « mosaïque » de cartilages de croissance [16].

La maturation de l'adolescence se caractérise par l'ossification des cartilages de croissance [4, 95] et par conséquent, l'augmentation de la taille. Les diaphyses n'interviennent pas directement, mais leur longueur s'accroît d'autant que le cartilage d'accroissement ou physe demeure actif ; quand cette activité cesse, la croissance s'interrompt [135] : c'est l'état de l'âge adulte.

A l'âge adulte, pendant la deuxième et la troisième décennie [69], l'os atteint sa longueur définitive, et ses épiphyses s'unissent et fusionnent avec leur diaphyse [69, 95, 96], elles sont alors soudées, et la ligne épiphysaire n'est plus visible, on dit qu'elle est fermée. En effet, après la fusion, il existe des vestiges de cette fusion entre diaphyse et épiphyse, pendant une ou deux années, sous la forme de lignes plus claires, qui vont ensuite s'estomper puis disparaître [121]. Pourtant l'aspect radiologique de la fusion précède la disparition de la bande épiphysaire, encore visible sur l'os sec. La disparition des lignes épiphysaires est soumise au contrôle hormonal [69].

1. Ossification secondaire des os du squelette appendiculaire

A la naissance, les diaphyses des os des membres sont complètement ossifiées, alors que les épiphyses sont encore cartilagineuses [95, 96].

Après la naissance, et à des âges variés de la vie postnatale, des centres (ou points) d'ossification secondaires se développent dans les épiphyses qui s'ossifient progressivement à leur tour [95, 96], et dont la connaissance de leur date d'apparition permet d'apprécier radiologiquement « l'âge osseux » [95].

a. La notion de « cartilage fertile » :

Cependant, çà persiste entre l'épiphyse et la métaphyse, qui est l'extrémité en croissance active de la diaphyse, une bande en plaque de cartilage

appelée le cartilage de croissance (ou de conjugaison ou cartilage épiphysaire) [95, 96]. Ce dernier, richement vascularisé, est particulièrement important dans la croissance osseuse en longueur [26, 87, 95, 96], d'où son appellation en « cartilage fertile » [26] ; sa riche vascularisation explique la localisation élective à son niveau de l'ostéomyélite de l'adolescent [26].

Dans les os longs, on trouve un cartilage de croissance à chaque extrémité [95], mais l'un est plus actif que l'autre. Les « épiphyses fertiles » sont celles qui correspondent aux cartilages les plus actifs, elles sont situées « près du genou et loin du coude », c'est-à-dire celles de l'épaule, du poignet et du genou : au niveau des épiphyses proximale de l'humérus, distale du radius et distale de l'ulna ; et au niveau des épiphyses distale du fémur et proximale du tibia [69].

Dans les os plus courts comme les phalanges, il n'y a de cartilage de conjugaison qu'à une seule extrémité [95].

A l'âge adulte, vers 20 ans [96], quand la croissance du corps s'achève [95, 96] et les os atteignent leur longueur définitive, les cartilages de conjugaison disparaissent [95] et les épiphyses fusionnent aux diaphyses [95, 96] ; les épiphyses qui s'ossifient en premier dans un os sont les dernières à fusionner aux diaphyses, et ce sont les épiphyses fertiles [69].

Cette terminaison de l'ossification est considérée comme le témoin privilégié d'une maturation accomplie, donc de la maturité somatique acquise [135].

b. La notion de « décalage » fille/garçon :

La maturation du squelette appendiculaire est plus lente chez le garçon que chez la fille [4] : les centres d'ossification secondaires apparaissent un à deux ans plus tôt chez les filles que chez les garçons, de même que la fusion épiphyso-diaphysaire, entre les centres épiphysaires et les diaphyses, intervient un à deux ans plus tôt chez la fille que chez le garçon [69], en moyenne à 18 ans pour les filles et à 19 ans pour les garçons [86].

En effet, il importe de souligner la maturation nettement plus décalée positivement chez les filles par rapport aux garçons et ceci dès le début de leurs existences. Du fait de la tendance à l'allongement des durées de terminaison de l'ossification, le décalage positif est plus grand que l'inverse : il est notoire que les adolescents « prenant leur temps » sont plus nombreux que les « expéditifs » et ceci est même devenu un critère sexuel tant les jeunes garçons tardent à devenir « matures » et ceci tout particulièrement en les comparant aux jeunes filles ! [135]

2. Calendrier postnatal d'apparition et de fusion des points d'ossification des os du squelette appendiculaire

Le terme d'« apparition » d'un point d'ossification secondaire signifie l'ossification initiale [132], c'est le moment où il devient visible, même à minima, sur la

radiographie [139]. Le terme de « fusion » ou « soudure », réservé pour un os long ou allongé, est le moment où l'épiphyse d'un os s'unit et fusionne avec la diaphyse [69, 95, 96] ou la métaphyse [135], la ligne épiphysaire n'est plus visible sur la radiographie [69].

a. Clavicule :

Le centre secondaire d'ossification de la clavicule est épiphysaire médial, apparaît dans l'extrémité sternale de l'os [19, 69, 90, 91, 112, 125] à partir d'une ébauche cartilagineuse [91, 112, 120].

Ce point d'ossification dans le squelette est le dernier à apparaître, avec ou peu après, le point de la tubérosité ischiatique. Il apparaît donc très tardivement, après la puberté [112], à 18 ans chez la fille et à 20 ans chez le garçon [91]. Quelquefois, ce point d'ossification survient bien avant, à 14 ans et demi chez la fille et à 15 ans chez le garçon [112].

Aussi, l'épiphyse médiale dans le squelette est la dernière à se souder complètement avec le corps de la clavicule bien après les points inférieure et médiale de la scapula [112]. Cette fusion survient durant la troisième décennie [69], entre 22 et 25 ans [19, 90, 91, 125].

b. Scapula :

Plusieurs points d'ossification secondaires « périphériques », unis à la plaque scapulaire par des cartilages de conjugaison « épiphysaires » [112].

On compte 8 à 10 points [125] qui apparaissent pendant l'adolescence [69] :

- Un point [25, 90, 120] ou deux points [69, 91] au niveau du **processus coracoïde :**

  Le premier point, principal [112], se trouve au centre du processus coracoïde [69, 91], apparaît au cours de la première année de la vie [25, 69, 112, 120], parfois à la naissance [69, 112].

  Le deuxième point, accessoire [112], se trouve à la base du processus coracoïde [69, 91] et au rebord de la cavité glénoïdale [69], apparaît à 14-15 ans [69, 91, 112].

  Le processus coracoïde se soude au corps de la scapula : à 15 ans chez la fille [19, 91, 125] et entre 17 et 18 ans chez le garçon [19, 91, 125].

- Un point [25, 90, 91, 112, 120] au niveau de **l'acromion :**

  Il apparaît entre 14 et 18 ans [25, 91, 112, 120].

  L'acromion se soude au corps de la scapula entre 17 et 20 ans [19, 91, 112, 125].

- Deux points au niveau de **la cavité glénoïdale** [90, 91, 112, 125] :

  Ils forment les parties supérieure et inférieure de la cavité glénoïdale [91, 112].

  Le premier point, glénoïdien supérieur, sous-coracoïdien, survient entre 10 et 12 ans ; le deuxième point, glénoïdien inférieur, apparaît entre 16 et 18 ans [91, 112].

Ces points se soudent au corps de la scapula : entre 16 et 18 ans pour le 1ier point ; et entre 19 et 20 ans pour le 2ème point [91, 112].

- Un point, marginal [112], au niveau du **bord médial** [69, 90, 91, 112, 125] :

  Il se forme entre 11 et 18 ans [120], ou même plus tard vers 18-20 ans [112].

  Il se soude au corps de la scapula entre 16 et 22 ans [120], ou plus tard entre 20 et 28 ans [19, 91, 112, 125].

- Un point inférieur, angulaire [112], au niveau de **l'angle inférieur** [69, 90, 91, 112, 125] :

  Il se forme entre 11 et 18 ans [91, 112, 120].

  Il se soude au corps de la scapula entre 16 ans et 22 ans [120], ou plus tard entre 20 et 28 ans [19, 91, 125].

- Un point pour **l'épine** [125] :

  Peut apparaître sous forme de gains osseux le long du bord dorsal de l'épine [112].

  Il se soude au corps de la scapula entre 20 et 28 ans [19, 125].

c. Humérus :

Il présente sept points d'ossification secondaires épiphysaires qui apparaissent entre la 2ème semaine de la naissance et la 12ème année [120], et se soudent au corps de l'os entre 20 et 26 ans [19, 125], l'épiphyse distale s'unit plus tôt que la proximale [112, 125] :

- **Trois points à l'épiphyse proximale** [25, 69, 90, 91, 112, 120, 125], qui apparaissent peu après la naissance [120] :
  - Un point pour la tête [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125], ou point céphalique [112] :

    Apparaît entre 6 et 20 mois de la vie [19, 25, 112, 125], ou même plus tôt entre 3 et 6 mois [91] ; ce point peut apparaître avant la naissance [112], comme il peut exister à terme [69, 112].
  - Deux points pour les deux tubercules, majeur et mineur [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125], ou points tubérositaires [112] :
    - Le point du tubercule majeur [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125] : apparaît à 6 mois chez la fille et à un an chez le garçon [69].
    - Le point du tubercule mineur [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125] : apparaît à 3 ans [69].

    Ces deux points précédents ne tardent pas à se souder l'un à l'autre au niveau du sillon intertuberculaire [112].

    Bientôt, vers l'âge de 4 à 5 ans [112], les deux points tuberculaires fusionnent avec le point céphalique [25, 112] pour former une épiphyse unique [69].

L'épiphyse unique, formée par les trois points d'ossification, se trouve séparée de la diaphyse par un cartilage de conjugaison [25] et qui se soude à elle vers 20 à 22 ans chez la fille et 21 à 25 ans chez le garçon [91] ; avant cet âge et si traumatisme, cette pièce osseuse peut se séparer de la diaphyse, c'est le décollement épiphysaire [25].

- **Quatre points à l'épiphyse distale** [25, 69, 90, 91, 112, 120, 125], qui apparaissent plus tard [120] selon l'ordre suivant : (1) capitulum et partie latérale de la trochlée, (2) épicondyle médial, (3) partie médiale de la trochlée, (4) épicondyle latéral [69].
  - Un point pour capitulum [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125] (ou point condylien [112]) :
    Donne le capitulum et la partie latérale de la trochlée [69].
    Il apparaît entre 6 mois et 2 ans [19, 25, 91, 124, 125].
  - Un point trochléaire [19, 25, 90, 91, 112, 125] :
    Donne la partie médiale de la trochlée [69].
    Il apparaît entre 8 et 16 ans [19, 25, 91, 112, 125].
  - Un point épicondylien latéral [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125] :
    Il apparait entre 11 et 18 ans [19, 25, 112, 124, 125].
  - Un point épicondylien médial [19, 25, 69, 90, 91, 112, 125] :
    Ce point se forme entre 5 et 9 ans [19, 25, 112, 125].

  Le mode de fusion de l'épiphyse distale avec le corps est variable [69] :
  - Les deux points, capitulaire et trochléaire, fusionnent en une pièce unique [112], à 9 ans chez la fille et à 10 ans chez le garçon [69].
  - Le point épicondylien latéral se réunit ultérieurement, aux deux points précédents ainsi fusionnés [112, 124], ces trois points « les plus latéraux » [69] s'unissent en un centre unique formant une pièce [25, 69, 112, 125] appelée la palette humérale [112], qui se trouve séparée de la diaphyse par un cartilage de conjugaison [25] et qui se soude à elle [25, 69, 112], à 13 ans chez la fille et à 16 ans chez le garçon [112]. Avant cet âge, des décollements épiphysaires peuvent se produire à différencier des fractures supra-tubérositaires [25].
  - Le point de l'épicondyle médial commence indépendant de la palette humérale et séparé d'elle par un petit prolongement de la diaphyse, qui forme la base de cet épicondyle [112] ; ce point s'unit à la diaphyse entre 20 et 26 ans [19, 25], et le retard de soudure de l'épicondyle médial peut être confondu avec une fracture [90].

  L'ensemble de ces quatre points forme l'épiphyse distale [26, 112] qui se soude à la diaphyse à 17-18 ans pour les filles et à 18-20 ans chez le garçon [26, 91].

d. Radius :

- L'épiphyse proximale se forme à partir de deux points secondaires :
  - L'un dans la tête radiale [19, 69, 90, 91, 112, 125] : apparait à 4 ans chez la fille et à 5 ans chez le garçon [69, 112].
  - L'autre dans la tubérosité radiale [19, 69, 90, 91, 112, 125] : apparait entre 13 ans [91, 112] et 14 ans [19, 91, 125].

  L'épiphyse proximale se soude à la diaphyse entre 14 et 17 ans [120].
- L'épiphyse distale se forme à partir d'un seul point épiphysaire distal qui apparait entre 9 mois et 24 mois chez la fille [139], parfois dès la naissance [112] ; et entre 9 mois et 30 mois chez le garçon [139]. Son processus styloïde se forme à 10-12 ans [120].

  Cette épiphyse se soude au corps à 17-20 ans chez la fille et à 20-25 ans chez le garçon [25, 91], cette soudure se passe peu de temps après la soudure de la tête à la diaphyse [69].

e. Ulna :

- L'épiphyse proximale se développe à partir d'un point au niveau de l'olécrâne [91, 124, 125], entre 8 et 11 ans [69, 112, 124] ; ce point épiphysaire proximal peut être double, par suite de l'existence d'un point particulier pour le bec de l'olécrâne [112].

  L'épiphyse proximale se soude bien avant la distale [120], à 13 ans chez la fille et à 15 ans chez le garçon [69].
- L'épiphyse distale se forme à partir d'un point d'ossification qui constitue le processus styloïde et la partie inférieure de la tête ulnaire [125] ; il apparait entre 5 ans et 9 ans chez la fille, et entre 6 ans et 10 ans [139] chez le garçon [69, 139]. Son processus styloïde s'ossifie entre 7 ans et 8 ans [120], au plus tard entre 10 à 12 ans [112].

  L'épiphyse distale se soude peu après la proximale [69], à 16 ans chez la fille et à 18 ans chez le garçon [69, 112].

f. Os du carpe :

A la naissance, le massif carpien est entièrement cartilagineux [25], ses os se développent chacun par un seul point d'ossification enchondrale [19, 25, 69, 125], sauf deux os : l'os hamatum qui présente un point complémentaire pour l'hamulus [25, 90, 91], et le scaphoïde qui résulterait de la soudure de deux pièces osseuses primitives, le scaphoïde proprement dit et l'os central du carpe [19, 112, 125].

L'ossification du carpe est tardive par rapport à celle du métacarpe et des phalanges qui débute tôt et se termine tard [20, 112]. Elle est un peu plus précoce chez la fille que chez le garçon [20].

Les points d'ossification des os du carpe apparaissent tous entre la naissance et l'âge de 6 ans [20, 112], et débutent dans le capitatum et l'hamatum [69]. Cette ossification se fait selon un ordre dessinant une spirale qui commence

par le capitatum et se termine par le pisiforme [90]. Cet ordre est comme suit : (1) le capitatum et l'hamatum peuvent apparaitre en même ordre [19, 91, 112, 120, 125], un peu avant un an [20], (2) le triquétrum vers l'âge de 2 à 3 ans, (3) le lunatum entre 2 ans et demi et 3 ans et demi, (4) le scaphoïde, le trapèze et le trapézoïde entre 4 et 6 ans [20], le trapèze et le trapézoïde précèdent le scaphoïde [19, 91, 125] ou apparaissent en même ordre que lui [112], (5) le pisiforme entre 8 et 11 ans [20].

La maturation terminale du carpe oscille d'environ 12 ans 6 mois à 15 ans 6 mois chez les filles, et de 13 ans 6 mois à 17 ans chez les garçons [135].

L'apparition des points d'ossification des os du carpe est comme suit :

- **Capitatum** : apparaît au cours de la première année [19, 25, 90, 112, 120, 125], entre 0 mois et 6 mois chez les deux sexes [69, 91, 139] (âge moyen : 3 mois [120, 139]).
- **Hamatum** : apparaît à la première année [19, 112, 120, 125], entre 0 mois et 9 mois chez les 2 sexes [69, 91, 139] (âge moyen : à 3 mois chez la fille et à 6 mois chez le garçon [139]).

  Cet os peut présenter un point complémentaire, pour l'hamulus [25, 90, 91] qui apparait entre 9 ans et 11 ans [91].

  N.B. : L'ossification débutent dans le capitatum et l'hamatum où ils peuvent apparaitre avant la naissance [69]. A 12 ans, ces 2 os s'ossifient complètement [91].
- **Triquétrum** : apparaît entre 1-4 ans chez la fille et 1-5 ans chez le garçon [69, 139].
- **Lunatum** : apparaît entre 1 an et demi et 7 ans chez la fille et entre 2 ans et 7 ans chez le garçon [69, 139].
- **Scaphoïde** : apparaît entre 4-7 ans chez la fille et 5-9 ans chez le garçon [69, 139]. Le scaphoïde résulterait de la soudure de deux pièces osseuses primitives, le scaphoïde proprement dit et l'os central du carpe [19, 112, 125].
- **Trapèze** : apparaît entre 3-7 ans chez la fille et 5-9 ans chez le garçon [69, 139].
- **Trapézoïde** : apparaît entre 3-8 ans chez la fille et 4-9 ans chez le garçon [69, 139].
- **Pisiforme** : apparaît entre 7-11 ans chez la fille et 9-13 ans chez le garçon [69, 139].

g. Métacarpiens :

Les métacarpiens ont une ossification d'os allongés [112].

- **Premier métacarpien :**

  Son point d'ossification est épiphysaire, apparait à l'extrémité proximale (ou base) [25, 69, 91, 112, 120, 124, 125], entre 1-3 ans chez la fille et entre 2-4 ans chez le garçon [139].

Il se soude à 14 ans chez la fille et à 17 ans chez le garçon [69, 112].

- **Quatre derniers métacarpiens :**
  Leur point d'ossification est épiphysaire, apparaît à l'extrémité distale (ou tête) [25, 69, 90, 91, 112, 120, 124, 125], entre 1-3 ans chez la fille et 2-4 ans chez le garçon [139]. Cette ossification peut se faire selon l'ordre suivant [91] : **MIII** (1 an et demi à 2 ans et demi) ; **MII** (3 à 4 ans) ; **MIV** (3 à 4 ans) ; **MV** (3 et demi-4 ans).
  Les épiphyses se soudent aux corps à 14 ans chez la fille et à 17 ans chez le garçon [69, 112].

N.B. : Il peut avoir un centre épiphysaire accessoire pour la tête comme pour la base [69, 124]. En effet, tous les métacarpiens peuvent être bi-épiphysaires en cas de déficience thyroïdienne [112]. Parfois, le premier métacarpien peut présenter un point d'ossification secondaire au niveau de la tête, et le second métacarpien peut en avoir un au niveau de la base ; ces points d'ossification accessoires, dénommés « pseudo-épiphyses » [69], visibles habituellement à la radiographie, fusionnés, au moins en partie, avec le corps de l'os [69, 124].

h. Phalanges des doigts :

Les phalanges ont aussi une ossification d'os allongés [112].

Le point d'ossification de toutes les phalanges est épiphysaire, au niveau de l'extrémité proximale (ou base) [25, 69, 90, 91, 112, 120, 124, 125]. Ces points apparaissent comme suit [139] :

- Phalange proximale du pouce : son point d'ossification apparait entre 1 an et demi et 3 ans chez la fille ; entre 2-5 ans chez le garçon ;
- Phalange distale du pouce : son point d'ossification apparait entre 9 mois et 3 ans chez la fille ; entre 1-3 ans chez le garçon ;
- Phalanges proximales des quatre derniers doigts : leur point d'ossification apparait entre 9 mois et 2 ans chez la fille ; entre 1 an et demi et 3 ans chez le garçon ;
- Phalanges moyennes des quatre derniers doigts : leur point d'ossification apparait entre 1 an et demi et 3 ans chez la fille ; entre 2-4 ans chez le garçon ;
- Phalanges distales des quatre derniers doigts : leur point d'ossification apparait entre 1 an et demi et 3 ans chez la fille ; entre 3-4 ans chez le garçon.

La soudure de ces épiphyses aux corps se fait à 14 ans chez la fille et à 17 ans chez le garçon [69, 112].

N.B. : La maturation terminale des épiphyses du pouce se voit d'environ 13 ans et demi à 16 ans et demi chez les filles et de 15 ans à 18 ans chez les garçons ; celle des épiphyses des quatre autres doigts, y compris les

métacarpiens, va d'environ 14 ans à 17 ans chez les filles et de 15 ans trois mois à 18 ans chez les garçons [135].

i. Os sésamoïdes de la main :

Ils se développent par un seul point d'ossification [112].

- Premier sésamoïde du pouce : apparaît entre 10-13 ans chez la fille, et 11-15 ans chez le garçon [139].
- Deuxième sésamoïde du pouce : apparaît entre 11-14 ans chez la fille, et 12-16 ans chez le garçon [69, 139].

j. Os coxal :

A la naissance, chacun des trois points d'ossification primaire a formé une partie de l'acétabulum [69], et pendant toute l'enfance [112], les trois pièces osseuses primitives sont séparés les unes des autres, au niveau de l'acétabulum, par un cartilage de croissance triradié (étoilé) en forme de « Y » [26, 69, 112, 124]. La forme du cartilage en « Y » se modifie avec l'âge par écartement de ses branches supérieures qui tendent à s'horizontaliser suite à l'extension de l'ossification iliaque ; ainsi, vers l'âge de 10 ans, le cartilage en « Y » s'est transformé en un cartilage en « T » [112].

La confluence dans l'acétabulum des trois pièces constitutives conduit à son ossification complète, avec disparition du cartilage en « Y » [26] ; la soudure des trois pièces coxales entre elles se font tardivement [112], débute à l'adolescence et se termine à la fin de l'adolescence ou au début de la vie adulte [69], comme suit :

- La soudure ischio-pubienne, se fait vers l'âge de 7 ans chez le garçon et 8 ans chez la fille [112].
- La soudure ilio-ischiatique, apparaît vers 13 ans chez la fille et 15 ans chez le garçon [112].
- La soudure ilio-pubienne, se fait à la fin de la puberté [112].

Les points d'ossification complémentaire [26, 112], de nombre variable [26], on les rencontre au niveau de : l'épine iliaque antéro-inférieure, l'épine sciatique, l'épine de pubis, la tubérosité ischiatique, l'angle de pubis, la symphyse pubienne, la crête pubienne, l'épines supérieures et la crête iliaque. Ce dernier point [19, 26, 69, 90, 91, 112, 120, 125], apparaît entre 13 et 15 ans [112, 120] et se soude à l'ilion tardivement [112], entre 20 à 25 ans [135].

k. Fémur :

Les points d'ossification secondaires, postnataux, sont au nombre de quatre, deux pour les épiphyses et deux pour les apophyses [112].

Au niveau de l'épiphyse proximale :

Cette épiphyse est marquée par trois noyaux : le point céphalique (point de la tête), le point du grand trochanter et le point du petit trochanter

Ces trois points fusionnent après la fin de la puberté [112], et la soudure de l'épiphyse proximale à la diaphyse a lieu entre 17 et 19 ans [112, 120].

Au niveau de l'épiphyse distale :

Le point épiphysaire inférieur est présent à la naissance [69], c'est le premier à apparaître avant celui de l'épiphyse proximale et le dernier à se souder à la fin de la croissance [112].

Ce point est unique [90, 91, 112, 125], il est dit point trochléen [112] ou point intercondylien [26, 91, 112] ou point de Béclard [26, 112].

Ce point donne naissance aux condyles fémoraux, le médial et le latéral [91].

Ce point épiphysaire distal a vivement retenu l'attention à cause de son intérêt médico-légal [26, 112], car il n'apparaît pas chez l'enfant, mais chez le fœtus de 36 SA [90, 124] (dès le 9ème mois IU [26, 91, 112, 124]) ou quelques jours avant la naissance [69, 125] : c'est le signe de maturité [120].

l. Patella :

Cartilagineuse à la naissance, elle s'ossifie plus tardivement [124] à partir de différents centres qui apparaissent au début de l'enfance et se soudent ensuite à l'adolescence [69].

Le noyau osseux de la patella apparait entre 2 ans et 4 ans [26, 69, 90, 91, 112, 124], mais elle reste longtemps en partie cartilagineuse [112]. L'ossification se complète entre 16 et 19 ans [26, 91].

m. Tibia :

Deux points secondaires sont affectés aux deux épiphyses du tibia :

- **Un point secondaire épiphysaire proximal** [19, 90, 91, 120], donnant le plateau tibial [26, 91, 125]. Il apparaît au voisinage du terme [26, 69, 91, 112] (fœtus de 38 SA [90]) ou à la naissance [19, 69, 124, 125].

  L'épiphyse proximale se soude à la diaphyse entre 18 ans et 24 ans [19, 26, 69, 91, 120, 125].
- **Un point secondaire épiphysaire distal** [19, 90, 91, 120, 125], qui apparait entre 1 an et 2 ans [112, 120, 125], parfois même avant entre 6 à 8 mois [19, 26, 91].

  L'épiphyse distale se soude à la diaphyse, un peu avant l'épiphyse proximale [69, 112], entre 16 à 18 ans [19, 26, 125].

  Ce point épiphysaire distale du tibia présente avec le point de Béclard un intérêt médico-légal pour déterminer l'âge du fœtus [26].

n. Fibula :

L'évolution de la fibula est en retard sur celle du tibia, ces deux épiphyses se développent, chacun, par un seul noyau d'ossification endochondrale [112].

- Le noyau de **la tête fibulaire** [19, 26, 69, 90, 91, 112, 120, 125] apparaît entre 3 et 6 ans [19, 26, 91, 112, 120, 125], cette date d'apparition est plus précoce chez la fille que chez le garçon [112].

- Le noyau de **la malléole latérale** [19, 26, 69, 90, 91, 112, 120, 125] apparaît entre 8ème et 12ème mois [19, 26, 69, 91].

o. Os du tarse :

Chaque os provient d'un seul point d'ossification, sauf le calcanéus ; les noyaux d'ossification secondaires des os du tarse apparaissent comme suit :

- **Talus** : un petit point complémentaire formera le tubercule latéral du processus postérieur du talus [69, 112], c'est un noyau inconstant [91] qui apparaît entre 5 à 13 ans [69, 91, 112].
- **Calcanéus** : il présente un point d'ossification secondaire postérieur [26, 91, 112] apparaît entre 6 et 9 ans [26, 91, 112, 125], il donnera une calotte postérieure [112] qui se transformera en tubérosité calcanéenne [69, 91].
- **Os cuboïde** : s'ossifie à partir d'un point d'ossification [26, 112] qui apparaît pendant les six premiers mois de la vie [26, 91, 112, 125].
- **Os naviculaire** : s'ossifie à partir d'un point d'ossification qui apparaît entre 3 et 5 ans [26, 91, 112, 120, 125].
- **Os cunéiforme médial** : s'ossifie à partir d'un point d'ossification qui apparaît entre 2 et 3 ans [26, 91, 112, 120, 125].
- **Os cunéiforme intermédiaire** : s'ossifie à partir d'un point d'ossification qui apparaît entre 2 et 3 ans [26, 91, 112, 120, 125].
- **Os cunéiforme latéral** : s'ossifie à partir d'un point d'ossification qui apparaît entre 1 et 2 ans [26, 91, 120, 125].

p. Les métatarsiens :

Comme les métacarpiens, ils ont une ossification d'os allongés [112].

- **Premier métatarsien :**

  Son point d'ossification épiphysaire est de type phalangien [112], qui apparait à l'extrémité proximale (base) [26, 69, 90, 91, 112, 120, 125], il se forme un peu plus tôt que celui des autres métatarsiens [112], entre 2 et 4 ans [26, 91, 120].
- **Quatre derniers métatarsiens :**

  Leur point d'ossification épiphysaire apparaît à l'extrémité distale (tête) [26, 69, 90, 91, 120, 125], entre 2 et 4 ans [26, 91, 120].

q. Phalanges des orteils :

Elles ont une ossification d'os allongés, avec un point primaire diaphysaire et un point secondaire épiphysaire proximal [112].

Leur point d'ossification épiphysaire apparaît à l'extrémité proximale (base) [26, 69, 90, 91, 112, 120, 125], entre 1 an et 5 ans [69, 91, 112, 120].

r. Sésamoïdes du gros orteil :

Ils commencent leur ossification entre 9 et 12 ans [69, 91].

Tableau 2 : TABLEAU RECAPITULATIF REFERENTIEL montrant les dates d'apparition et de soudure des centres d'ossification des os du membre thoracique en postnatal

[**(+)** date d'apparition, **(s)** date de soudure, **(o)** date d'ossification complète]

Ages (année) / **Os**	**0 - 1**	**1 - 2**	**2 - 3**	**3 - 4**	**4 - 5**	**5 - 6**	**6 - 7**	**7 - 8**	**8 - 9**	**9 - 10**	**10 - 11**	**11 - 12**	**12 - 13**	**13 - 14**	**14 - 15**	**15 - 16**	**16 - 17**	**17 - 18**	**18 - 19**	**19 - 20**	**20 - 21**	**21 - 22**	**22 - 23**	**23 - 24**	**24 - 25**	**25 - 26**	**26 - 27**	**27 - 28**	**28- 29**
Clavicule															+	+		+	+	+	+	s	s	s	s	s			
Scapula	+	+								+	+	+	+	+	+ s	+ s	+ s	+ s	+ s	+ s	+ s	s	s	s	s	s	s	s	s
Humérus, épiphyse proximale	+	+	+	+																s	s	s	s	s	s	s			
Humérus, épiphyse distale	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+ s	+ s	+ s	s	s								
Radius, épiphyse proximale				+	+	+							+	+ s	+ s	s	s	s	s										
Radius, épiphyse distale	+	+	+														s	s	s	s	s	s	s	s	s	s			
Ulna, épiphyse proximale								+	+	+	+		s	s	s	s													
Ulna, épiphyse distale					+	+	+	+	+	+	+					s	s	s	s										
Scaphoïde				+	+	+	+	+	+	+																			
Lunatum		+	+	+	+	+	+	+																					
Triquétrum	+	+	+	+	+	+																							
Pisiforme							+	+	+	+	+	+	+	+															
Trapèze			+	+	+	+	+	+	+	+																			
Trapézoïde			+	+	+	+	+	+	+	+																			
Capitatum	+											o	o																
Hamatum	+											o	o																
Métacarpiens	+	+	+	+	+									s	s		s	s											
Phalanges des doigts	+	+	+	+	+	+								s	s		s	s											
Sésamoïdes du pouce										+	+	+	+	+	+	+	+												

I. 5. Les facteurs influençant la maturation osseuse

1. Introduction :

Contrairement aux systèmes inertes, qui ont une durée d'existence généralement très longue et une structure relativement simple, les systèmes vivants - l'être humain en particulier - ont une durée d'existence relativement courte, et une structure complexe [137].

Pendant toute la durée de la vie d'un être humain, la structure de son organisme évolue, par de multitude de processus spatio-temporels, de nature bio-physico-chimique. Ces processus, dont chacun a un début et une fin, ont entre eux des liens plus ou moins étroits, certains sont réversibles, la plupart d'entre eux ne le sont pas [137].

Le déroulement de chacun de ces processus est tributaire d'une part de causalité endogène (génétique) et d'une part de causalité exogène (milieu). On conçoit donc l'importance que peut prendre la variabilité interindividuelle induite, dans toute population, par la multiplicité des facteurs régissant, séparément ou conjointement, le déroulement de chacun de ces processus [137]. Ces facteurs sont des mécanismes complexes régulateurs de la croissance [4, 87], et qui influencent la maturation osseuse et par conséquent l'estimation de l'AO, on cite parmi eux [32, 37, 38, 69, 86, 88, 137] : le niveau socio-économique, les facteurs ethniques et géographiques, les facteurs génétiques, nutritionnels et endocriniens, les pathologies, etc...

En effet, il est connu que par exemple une carence alimentaire, des troubles hormonaux et certaines maladies ont des conséquences sur la croissance des os. C'est pourquoi de tels facteurs doivent être pris en considération pour un cas isolé. Encore - ce qui est plus grave - la croissance des os pour les personnes d'une autre origine ethnique évolue autrement [54].

Tous ces facteurs seront à l'origine d'une grande variabilité interindividuelle d'ordre « physiologique » ou « biologique » existant entre des individus normaux du même âge, entre les différents groupes d'épiphyses d'un même individu, et entre l'évolution osseuse des garçons et celle des filles, surtout à la puberté… toutes ces variations, rendent la mesure du degré de maturation difficile [139], et doivent être pris en compte dans les méthodes d'évaluation de l'AO [32].

2. Classification :

Plusieurs facteurs, intriqués, intervenant dans la maturation osseuse [37, 38, 88]. Des auteurs ont tentés d'énumérer et de classer ces facteurs en termes assez généraux qui paraissent utiles afin de les garder à l'esprit [107]. En effet, les facteurs qui influencent la maturation squelettique peuvent être classés en trois catégories [37, 38, 107] :

- **Les facteurs génétiques :**
  Ce sont des facteurs génétiquement transmissibles [107].
- **Les facteurs intrinsèques :**
  Ils résument les conditions de l'environnement interne [107].

L'évaluation de l'environnement interne dans son influence sur la croissance et le développement revient presque à paraphraser la responsabilité clinique du pédiatre envers son patient. Simplement dans le but d'établir de larges subdivisions, cet environnement interne englobe plusieurs vastes territoires, à savoir (1) le déséquilibre endocrinien, (2) les malformations, et (3) les infections, et bien d'autres [107].

- **Les facteurs extrinsèques :**

  Ils résument les circonstances de l'environnement externe [107].

  Le facteur de l'environnement intègre plusieurs composantes : alimentation, niveau culturel, environnement psychoaffectif et niveau socio-économique. Ce dernier se reflète sur la qualité du régime alimentaire, les disponibilités alimentaires, le pouvoir d'achat, le revenu et les conditions de soins. D'autres facteurs influencent la croissance des enfants tel que le milieu pathogène le rang de naissance, la dimension de la famille et de la fratrie [116].

Concernant l'effet de la race, du groupe ethnique, il s'est avéré difficile de rassembler des données sans équivoque. Dans un certain nombre d'enquêtes approfondies sur la croissance, on est parvenu à la conclusion que les différences de stature moyenne et de poids corporel moyen constatées entre des groupes de population contrastés ne pouvaient pas être dues à des différences raciales plutôt qu'environnementales. L'équilibre est nécessaire entre les facteurs environnementaux tels que l'approvisionnement alimentaire, l'expérience de la maladie et les conditions générales de vie, dans des environnements naturels ou migratoires [107].

a. Le facteur génétique = L'hérédité familiale

La génétique est l'étude de la transmission des caractères héréditaires chez les êtres vivants ; L'hérédité est la transmission des caractéristiques d'une génération à une génération suivante. C'est lors de la reproduction que se transmet l'information héréditaire des parents aux enfants sous forme de gènes. En effet, ce sont les gènes qui codent pour différentes caractéristiques physiques et contrôlent le fonctionnement de l'organisme, ils agissent sur le développement et contribuent à l'état de la santé de l'individu à toutes les étapes de sa vie [43].

La constatation simple de variations fréquentes et amples dans l'ordre d'apparition des os et épiphyses - et plus encore dans l'ordre des changements évolutifs quelque soient les articulations - et cela même chez l'enfant bien portant, fait pendant à la notion fondamentale de PRYOR sur la variabilité génétique de l'ostéogénèse [139]. Il ne peut donc y avoir d'uniformité dans l'ossification, ni sur le plan individuel, ni sur le plan des moyennes collectives et c'est là le défaut fondamental des « Atlas » dits de Maturation tels qu'ils ont été publiés [139].

Bien que le schéma de croissance est globalement le même pour tous les individus, quelle que soit leur origine génétique [67], ce facteur génétique est présent alors tout au long de la période de croissance, il intervient par exemple de façon

évidente sur les proportions des différents segments et sur la taille finale de l'enfant [87] : la taille des enfants est liée alors à celle des parents [86].

Prenant deux exemples : celui des enfants de grande taille dont leurs tailles sont généralement constitutionnelles, familiales ; et celui des enfants de petite taille dont leurs tailles sont aussi constitutionnelles dans l'immense majorité des cas, marquées dans leur entourage familial [87]. Ici, les traits génétiquement transmissibles autres que les caractéristiques raciales peuvent influencer la croissance à d'autres égards. Les familles de grande taille et les familles de petite taille sont souvent fidèles à leur forme [107].

b. Le facteur ethnique = La race

L'**ethnie** et la **race** sont deux termes très discutables. Mise à part le mode de différenciation entre race et ethnicité courant en sciences sociales et politiques, la différence la plus couramment opérée entre la race et l'ethnicité renvoie la première au domaine du biologique, la seconde à celui du culturel [44].

L'influence de l'origine ethnique est un sujet qui a été toujours très débattu [37] ; pour Eveleth-Tanner (1974) et Legoux (1962), il existe des différences ethniques et diachroniques dans le rythme de l'évolution ontogénétique (développement de l'individu) [63].

Pour de nombreux auteurs le « facteur ethnique » est prépondérant [67], et de nombreuses études sur l'influence de l'ethnie et la pertinence des méthodes selon l'ethnie ont été faites :

- Les études américaines anciennes, surtout avant les années 1950-1960 (Christie, Hess et Weinstock, Kelly et Reynolds, Meredith), opposaient souvent les enfants « noirs » aux enfants « blancs » et utilisant la notion de « race » ; cette dichotomie binaire a été largement battue en brèche grâce aux progrès de la génétique des populations [37] ;
- Beunen et coll. (1990) trouvent, dans un large échantillon de la population belge une différence du « temps de maturation » par rapport à la population britannique de référence qu'ils attribuent à la variation biologique entre les populations (variation indifféremment nommée ethnique selon les auteurs) [67].
- Zhen et Baolin, trouvent aussi une avance des enfants chinois de 6 à 12 mois vers l'âge de 10 ans par rapport à la population caucasoïde de référence, et ils reportent des résultats similaires pour des enfants japonais et indiens d'autres études et évoquent un facteur ethnique pour cette différence [67].
- Cependant, Ashizawa et coll. montrent non seulement une avance des enfants japonais plus rapide avant la puberté, mais aussi après et avec une maturation complète plus rapide (de environ 1-2 ans) par comparaison aux enfants européens et chinois d'autres études comparables et concluent à une différence ethnique (par rapport aux européens) et socio-économique et nutritionnelle (par rapport aux chinois) [67].

- Işcan et coll., qui eux évaluent l'AO sur des aspects à la fois de maturation et dégénératifs de l'extrémité sternale de la 4ème côte, trouvent aussi des différences entre individus d'origine ethnique différente telles qu'une entrée dans la 1ère phase plus précoce chez l'afro-américain que chez l'américain caucasoïde et, à partir de 30 ans une surestimation de 3 à 10 ans de l'âge pour ces premiers [67]. Ces auteurs font appel à un facteur ethnique pour expliquer ces différences et citent d'autres études démontrant une maturation osseuse plus rapide avec une structure osseuse plus dense chez les noirs [66, 67]. Cependant Işcan et coll. ne peuvent exclure l'impact socio-économique (le type d'alimentation et le degré d'activité physique) sur la maturation et le vieillissement osseux sachant que plus de 50% des sujets de leur échantillon d'afro-américains possédaient une activité professionnelle manuelle par rapport aux américains caucasoïdes de leur étude [67].
- Cavalli-Sforza et al. (1994), s'appuyant sur des études génétiques, avaient divisé la population mondiale en 4 sous-groupes ethniques majeurs appelés « africains », « australiens », « caucasiens » et « mongoloïdes » [37] ;
- Ontell et al., à partir d'un échantillon d'enfants nord-américains, décrivaient des sous-groupes ethniques (asiatiques, hispaniques, noirs, blancs) tirés du codage administratif hospitalier. Cette méthode de classement était peu scientifique et les auteurs utilisaient encore le terme de race quand ils décrivaient leurs échantillons [37]. Ils concluaient que la méthode Greulich-Pyle (GP) doit être utilisée avec beaucoup de précautions [66] et conseillaient la prudence dans l'interprétation de l'AO chez les filles noires et hispaniques au moment de l'adolescence (avance de maturation entre 9 et 10 mois) ainsi que chez les garçons asiatiques et hispaniques à partir de la préadolescence (avance de maturation entre 9 et 11 mois et demi) [37, 66];
- Dans la plupart de ces publications, les auteurs insistaient sur les différences de maturation entre « blancs » et « noirs » en les liant implicitement à l'origine ethnique sans avoir recherché l'influence d'autres facteurs comme le niveau socio-économique ou la corpulence [37] ;
- Une étude empirique a donné comme résultat, que l'ossature des jeunes du sud-est européen vient en moyenne un peu plus vite à maturité que celle des jeunes allemands [54]. La maturation osseuse est plus précoce chez les enfants de race africaine [88], et pour ces enfants noirs africains, on a constaté des écarts jusqu'à trois ans par rapport au tableau établi. D'où la nécessité de tableaux tenant compte des particularités ethniques du sujet [54] ;
- Contrairement aux publications venant des Etats-Unis, les publications européennes s'attachaient surtout à vérifier l'adéquation des méthodes d'estimation de l'âge à leur population sans faire de jugement de valeurs et

en utilisant essentiellement des critères géographiques plus qu'ethniques [37] ;

- La grande majorité des publications européennes concernaient les pays d'Europe de l'Ouest, au niveau socio-économique élevé, et l'adéquation de ces populations avec le Greulich et Pyle (GP) était bonne [37] ;

En faisant la synthèse de ces publications, on peut tirer plusieurs conclusions concernant l'influence du facteur ethnique sur la maturation squelettique :

- Il apparaît que, plus que l'ethnicité, ce sont les niveaux socio-économiques qui ont le plus d'influence en termes de maturation osseuse. C'est pour cela que les études portant sur des pays d'Europe de l'Ouest montrent une bonne corrélation en utilisant les méthodes classiques (GP et TW2) alors qu'il existe des variations significatives pour des populations plus pauvres [37]. En effet, Schmeling et coll. (2000) en effectuant une revue de la littérature concernant un possible effet ethnique sur la maturation osseuse, ont retenu 80 articles et leur conclusion est sans appel. La composante ethnique ne joue aucun rôle sur la maturation osseuse, évaluée selon GP, car cette dernière montre un déroulement identique quelle que soit l'origine du sujet. De plus, les différences généralement notées sont temporelles et du ressort du développement socio-économique (état nutritionnel, de santé, ...) de la population étudiée. En conséquence pour ces auteurs il n'y a pas de contre-indication à l'utilisation de la méthode GP en médecine légale pour évaluer l'AO d'un sujet quelle que soit son origine ethnique [67].
- Il est important de noter que toutes ces études montrent que les méthodes d'estimation de l'AO peuvent s'appliquer, quelle que soit l'origine ethnique, même s'il peut exister des décalages de maturation [37].
- En pratique médico-légale, il est très délicat de prendre en compte l'ethnicité dans l'estimation de l'âge mais il faut souligner que c'est le niveau socio-économique qui a le plus d'influence [37]. Les individus concernés par des procédures de justice pour lesquels une estimation d'âge est demandée sont en grande majorité issus de niveau socio-économique défavorisé et donc auront le plus souvent un retard de maturation avec un AO inférieur à leur AC ce qui leur sera juridiquement profitable [37].
- En bref, il est maintenant bien établi que le concept de « race » est un concept erroné en ce qui concerne l'homme [37]. Malheureusement, et malgré ces données scientifiques, on trouve encore dans des publications récentes la notion d'un classement des individus selon leur « race » [37].

c. Le facteur alimentaire = La nutrition

La nutrition intervient de façon évidente dans la maturation squelettique [87]. En effet, l'accélération de la croissance, ces derniers temps, est sous l'effet de l'amélioration de l'alimentation et de celle d'autres conditions de la vie [63].

L’alimentation joue un rôle primordial. Des apports nutritionnels adéquats sont nécessaires pour un développement normal de l’enfant. Ceci est démontré par la restriction alimentaire, qui conduit à l’anorexie mentale à l’échelon individuel, et aux malnutritions endémiques à l’échelon de la population [116]. Les dénutritions s’associent à des retards de croissance [87], ainsi que certaines carences nutritionnelles, dont souffrent bien souvent des individus, influent sur le développement statural d'un enfant [86].

Il convient de mentionner la démonstration de Baptist et de Mel (1955) selon laquelle les enfants élevés avec un régime à base de céréales, de légumineuses et de légumes ont connu une croissance aussi satisfaisante qu'un groupe test auquel avait été fourni un supplément de protéines de lait. Leurs sujets étaient âgés de 1 à 6 ans [107].

La supériorité d’un régime alimentaire adéquat sur un régime inadéquat est peut-être mesurée de manière moins subtile en termes de croissance que par d’autres critères, notamment biochimiques, qui peuvent définir l’insuffisance avec plus de précision que ne le permettent les mesures conventionnelles des dimensions externes [107].

Dans une série d'expériences faites sur des sujets avaient entre 5 et 10 ans et publiées en 1951, l’étude arrive à la conclusion que pour certains sujets, la consommation volontaire de nourriture ne fournissait pas suffisamment de calories pour une prise de poids satisfaisante : « ni l'appétit ni aucune des normes connues ne peuvent être invoqués pour fournir des apports alimentaires adéquats à chaque enfant » (Macy et Hunscher, 1951). Les observations de Widdowson (1951) dans des orphelinats allemands ont montré de manière convaincante que la réaction affective d'un enfant face au personnel de surveillance influençait clairement sa prise de poids, contrebalançant l'effet de différences mineures dans l'apport calorique [107].

L’alimentation n’est pas influencée tout le temps par les habitudes alimentaires et le contexte socio-économique et culturel. Obert et coll. (1994) ont montré que lorsque les bonnes conditions nutritionnelles et socio- économiques sont réunies, le développement des enfants n’est pas affecté [116].

Aujourd’hui, les problèmes d’approvisionnement, de transport, de conservation, de distribution ont été résolus. Les aliments de l’ensemble du monde sont disponibles et circulent largement, les fluctuations saisonnières ont disparu, les préparations alimentaires sont plus hygiéniques et seuls environ 15 % des revenus sont consacrés en moyenne à l’alimentation [7].

La nutrition est clairement un facteur critique. Cependant, en Europe, l’apport nutritionnel n’est probablement plus un facteur limitant. La qualité, plutôt que la quantité, de l’apport nutritionnel est suffisante, à savoir les protéines animales, les micronutriments et les vitamines (Allen et Uauy, 1994) [7].

d. Le facteur endocrinien = Les hormones

Les divers aspects de maturation (dentaire, sexuelle secondaire et osseuse) sont d'ordre biologique et nos connaissances progressent actuellement en ce domaine grâce aux recherches entreprises sur la maturation hormonale et enzymatique [139].

La croissance cartilagineuse résulte de l'équilibre entre la prolifération des chondrocytes et la minéralisation des zones de croissance chondrocytaire [89], et tous ces processus de croissance se font sous influences hormonales [120]. En effet, la maturation osseuse est sous l'influence de facteurs intrinsèques des cellules de la trame cartilagineuse et de facteurs hormonaux qui influencent la maturation. Il est donc classique de considérer que des anomalies quantitatives ou chronologiques de l'exposition des cartilages à ces facteurs hormonaux modifient la vitesse de maturation osseuse [89].

Il est connu aussi que l'os est tributaire d'une régulation hormonale pendant la croissance impliquant l'hormone de croissance (GH), le facteur de croissance somatomédine C (ou Insulin-like Growth Factor 1 : IGF1) et aussi la testostérone chez le garçon. En cas d'insuffisance gonadique chez l'adolescent, un retard pubertaire apparaît (alors que le pic pubertaire est attendu vers 14 ans) avec comme conséquence un AO inférieur à l'AC. Au contraire, une hypersécrétion d'androgène est responsable d'avance staturale chez l'enfant [67].

Plusieurs hormones interviennent dans la régulation du développement somatique [86], elles sont nombreuses, les plus essentielles sont [4, 86, 87, 89] : les stéroïdes sexuels et le GH :

- **Les stéroïdes sexuels** :

  Les stéroïdes sexuels (œstrogènes, progestérone et androgènes) jouent un rôle prépondérant dans la maturation squelettique, à rapprocher des repères radiologiques assez précis et reproductibles qui accompagnent habituellement le début de la puberté (sésamoïde du pouce) [89]. En effet, l'action des stéroïdes sexuels est double, d'une part, par l'intermédiaire de GH, d'autre part, par action directe sur le cartilage. L'action se fait par l'intermédiaire des estrogènes qui ont une action de progression et de maturation osseuse. Ils sont essentiellement responsables de la fusion des cartilages de croissance [87]. Dans cette optique, et dans le cadre du retard pubertaire, lorsqu'il est authentifié, le traitement repose sur l'administration de stéroïdes sexuels à faible dose afin de permettre une accélération de la croissance sans maturation définitive précoce [87].

- **L'hormone de croissance (growth hormone : GH)** :

  L'hormone hypophysaire de croissance est le principal facteur endocrinien [4], sécrétée par l'antéhypophyse, elle-même dépendante d'un facteur stimulant hypothalamique (growth hormone-releasing hormone : GH-RH). La sécrétion de GH est nocturne, elle se fait de manière pulsatile [87].

Le GH agit sur l'os par l'intermédiaire de facteurs de croissance IGF-1 sécrétés par le foie [87, 89]. L'action de l'IGF-1 se fait directement sur le cartilage de croissance [87].

C'est l'augmentation massive des stéroïdes sexuels au moment de la puberté qui déclenche la sécrétion d'hormones de croissance et, par conséquence, la production hépatique d'IGF-1 [87].

- **Autres hormones :**
  - Les hormones thyroïdiennes : elles stimulent la croissance et la maturation osseuse [87] ;
  - Les glucocorticoïdes : impliqués dans la croissance [87] ;
  - Le complexe hormone « Vitamine D - Calcitonine » : il s'agit d'un groupe agissant sur la minéralisation osseuse par l'intermédiaire de l'équilibre phosphocalcique [87].

e. Le facteur socio-économique = Le revenu et la santé

Le statut socio-économique se présente sous plusieurs aspects, tels :

- La population urbaine ou rurale : l'origine urbaine des enfants est un critère important en terme de niveau socio-économique [37] ;
- La corpulence : l'augmentation de la corpulence avec le haut niveau socio-économique [38] ;
- Le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant [37] ;
- Le niveau de santé et la qualité du système sanitaire par le biais de l'espérance de vie et de la mortalité infantile [37].

Les études évaluées jusqu'à présent semblent suggérer qu'il existe un potentiel génétiquement déterminé de maturation squelettique qui ne dépend pas de l'origine ethnique et qui est disponible pour être exploité dans des conditions environnementales optimales, c'est-à-dire un SEE élevé, alors qu'un environnement moins favorable peut conduire à un retard de maturation squelettique [130]. Pour cela, le SSE d'une population donnée est d'une importance décisive pour le taux d'ossification [130], et son influence sur la maturation squelettique est prédominante [37].

Cette hypothèse semble être étayée par des études sur la relation entre le SSE et la maturation squelettique dans des sociétés aux normes socio-économiques très avancées, puisque l'amélioration du niveau de vie au cours des dernières décennies a entraîné une maturation squelettique accélérée [130]. En outre, il existe plusieurs études sur les effets retardateurs que la malnutrition et les mauvaises conditions d'hygiène ainsi que l'augmentation de la morbidité peuvent avoir sur la maturation du squelette [130].

Rikhasor et coll., sur 750 enfants pakistanais ont relevé un AO concordant à celui des standards de GP pendant la 1ère année de vie et les 2 premières années de vie respectivement chez les garçons et les filles, suivi d'un retard dans les deux sexes jusqu'à la puberté (15 et 13 ans respectivement). Ces auteurs attribuent ce retard

à l'incidence élevée de maladies et à la malnutrition chez les enfants pakistanais par rapport aux occidentaux [67].

L'étude Chaumoître et al., arrive à des conclusions très intéressantes [38] :

- La maturation osseuse est liée au niveau socio-économique ;
- L'influence est significative du niveau socio-économique sur l'AO : plus le niveau est favorisé, plus la maturation est avancée ;
- La maturation est liée à la qualité du système de santé comme le souligne une méta-analyse récente de la littérature ;
- L'action du niveau socio-économique sur la maturation est visible à l'échelon individuel : la maturation d'un individu favorisé est avancée par rapport à celle d'un individu défavorisé ;

L'application des normes radiographiques à une personne dont le SSE est inférieur à celui de la population de référence conduit à une sous-estimation de l'âge de cette personne. En termes de responsabilité pénale, cela n'entraîne aucune conséquence néfaste pour la personne concernée. Il est donc, possible en médecine légale d'utiliser l'estimation de l'AO selon GP ou TW pour un sujet qui proviendrait d'un milieu socio-économique moins élevé que ceux de l'étude de référence, cette personne se voit assigner un âge plus jeune que le réel [67, 130].

f. Le facteur physique = Les contraintes mécaniques

Les contraintes appliquées au cartilage de croissance peuvent varier en intensité, en direction, en cycle de production amenant des réponses différentes de la physe. Cette notion a passionné plusieurs générations de chercheurs. Un bon nombre de théories, de lois ont été énoncées sans qu'aucune ne puisse expliquer clairement et de façon reproductible la réponse du cartilage de croissance aux contraintes mécaniques, quelquefois avec des controverses « historiques » [87] :

- En 1979, Frost a proposé une théorie (la loi de Frost) qui stipule que le cartilage de croissance doit être soumis à une compression « optimale » pour fonctionner au maximum de ses capacités et produire ainsi le maximum de croissance (Fig. 13).

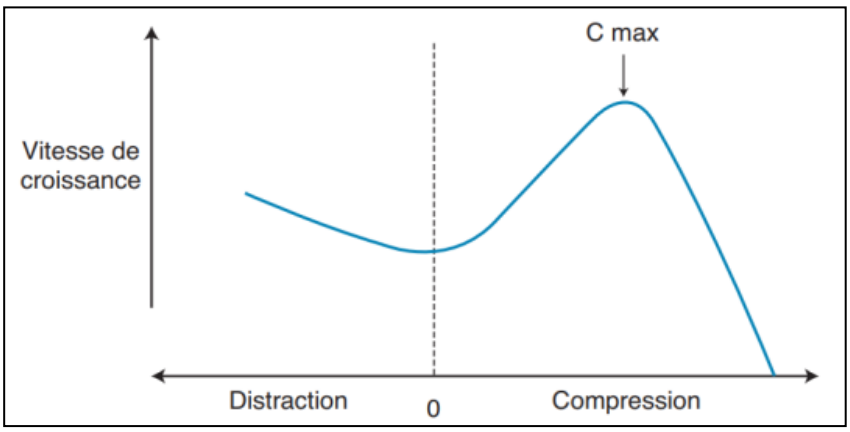


Figure 13 : La courbe de Frost. A gauche du 0, les forces en distraction entrainent une stimulation de la croissance. A droite du 0, les forces en compression entrainent une stimulation de la croissance jusqu'à une valeur maximale à partir de laquelle il y a diminution [87]

Selon la théorie de Frost, le cartilage de croissance possède une activité de base (c.-à-d. la croissance observée lorsqu'il n'existe aucune contrainte en compression) qui est faible. À partir d'un certain degré de compression (situation physiologique), le cartilage est stimulé. Au-delà d'un seuil (en situation pathologique), le cartilage est inhibé [87].

- Bien qu'elle soit séduisante, la théorie de Frost reste à ce jour controversée. En effet, s'il est clairement démontré in vivo que les contraintes mécaniques en compression freinent l'activité du cartilage de croissance, il n'a jamais été démontré qu'une faible dose de compression, même appliquée seulement quelques minutes par jour, ait un quelconque effet stimulant sur le cartilage de croissance. La théorie du « rebond », décrite par Bonnel apporte peut-être un élément de réponse à ces controverses.

Les contraintes mécaniques dans la pratique sportive :

- À côté des fractures diaphysaires, la pathologie traumatique aiguë de l'enfant sportif sera préférentiellement une pathologie du cartilage épiphysaire, réalisant un décollement ou une fracture épiphysaire, là où l'adulte sera victime d'une entorse, avec le risque potentiel ultérieur de raccourcissement ou d'angulation osseuse par épiphysiodèse totale ou partielle [16].
- La pathologie chronique de sur-sollicitation est responsable d'ostéochondroses qui représentent 80 % des microtraumatismes chroniques de l'enfant, conséquences d'efforts excessifs en compressions exercées sur le cartilage enchondral articulaire ou en tractions sur le cartilage apophysaire (noyau d'ossification secondaire, non articulaire, recevant une insertion tendineuse). Les ostéochondroses apophysaires sont à l'enfant ce que sont les tendinites à l'adulte [16].

  Rappelons le cas des enfants sportifs de haut niveau tels que les gymnastes qui voient leur croissance et leur puberté décalées dans le temps [87] : le sport ne rend pas petit, mais la pratique intensive de certains sports, tels que la gymnastique aux agrès, le patinage artistique, la danse mais aussi le tennis, peut retentir momentanément sur la croissance. La vitesse de croissance diminue, il existe un retard statural (pouvant atteindre -2 à -3 écarts-types) associé à un retard de maturation osseuse (pouvant atteindre plus de deux ans sur l'AR) et donc un retard pubertaire (fig. 14). Le bilan hormonal, qui doit être systématique devant un retard statural de plus de deux écarts-types, est normal. L'arrêt du sport entraîne un rattrapage avec une augmentation de la vitesse de croissance. Mais, même si le sport est maintenu au même niveau, ces jeunes sportifs (surtout les filles) atteignent, avec un décalage correspondant à leur retard d'AO, la taille qu'ils auraient

eu s'ils n'avaient pas fait de sport. Il s'agit, dans ces cas, d'un retard simple mais provoqué de la croissance et de la puberté. Il ne nécessite aucun traitement [16].

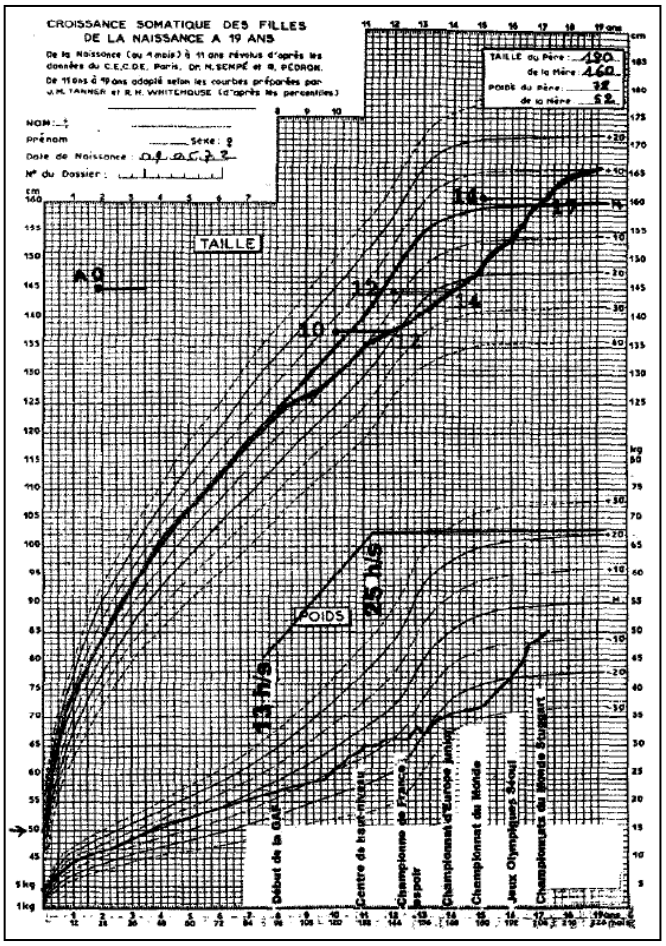


Figure 14 : La courbe de croissance d'une gymnaste [16]

g. Le facteur « temps » = L'évolution séculaire

L'évolution séculaire désigne les modifications du développement physique et de la maturation observée d'une génération à l'autre. Elle traduit tout changement morphologique observé depuis le plus jeune âge chez les garçons et les filles de même âge à des périodes distinctes [93].

Un grand intérêt continue d'être porté sur l'évaluation de la tendance séculaire, l'accélération de la croissance et de la maturation dont font preuve les enfants d'aujourd'hui par rapport aux enfants sélectionnés de manière similaire des générations passées. Concernant le phénomène lui-même, l'augmentation de la taille, du poids et d'autres mesures des enfants d'un âge donné lorsqu'on les compare aux dossiers des enfants du même âge à l'époque de leur père ou avant, aucun doute sérieux ne persiste [107].

L'évolution séculaire a toujours suscité l'attention des scientifiques et des anthropologues sur les transformations évolutives affectant les populations de nombreux pays [93], ces anthropologues ont de longue date, illustré les

changements séculaires de la croissance en liaison avec les processus d'industrialisation et de modernisation [7], ci-après des études et des résultats :

- La tendance séculaire de la croissance des enfants se reflète dans un déplacement progressif vers la gauche des courbes de croissance sur l'échelle de temps (Meredith, 1941 ; Weir, 1952 ; Clements, 1953) résume la tendance sur un intervalle de 70 ans en montrant qu'en termes de taille et de poids, l'enfant de 6 ans de 1953 se trouve à peu près au même stade que l'homme de 71 ans de 1883 [107] ;
- Loder et coll. ont voulu vérifier l'applicabilité de la méthode GP basée sur un échantillon de sujets caucasoïdes des années 1940 avec leur échantillon provenant de la même région des USA mais des années 1980-90. Pour ce qui concerne les enfants caucasoïdes, leur conclusion n'est pas univoque : pas de différence d'âge estimé pour les filles caucasoïdes et, d'abord sous-estimation de 0,4 an de l'âge pendant l'enfance puis surévaluation de 0,5 an de l'âge pendant l'adolescence chez le garçon caucasoïde [67] ;
- Hauspie et coll. (1997), ont montré que l'évolution séculaire de la taille observée en Europe occidentale est de l'ordre de 1 cm par décennie [7] ;
- Bodzsar et Susanne (1998), Susanne et coll. (2001), observaient dans les pays européens depuis le XIX^{ème} siècle, une croissance et un développement plus rapides, des tailles moyennes plus élevées et une maturation plus précoce (fig. 15) [7] ;

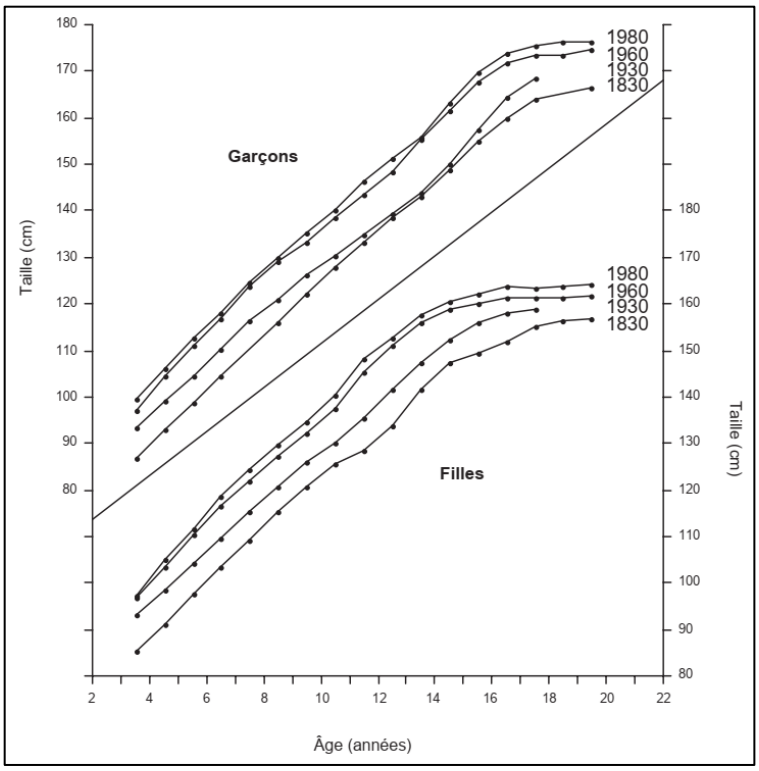


Figure 15 : L'évolution séculaire en Belgique (d'après Vercauteren, 2003) [7]

- L'augmentation séculaire moyenne de la stature en Europe est d'environ 1,5 cm/décennie durant l'enfance et de 2,5 cm/décennie durant l'adolescence et de 1 cm/décennie à l'âge adulte [93] ;
- Des auteurs ont trouvé que la maturation squelettique est plus précoce, au moment de l'adolescence, dans les années 90 que dans les années 30 [86].

Les changements séculaires doivent être interprétés en fonction de l'ensemble des facteurs socio-économiques et nutritionnels [7] : la disponibilité de la nourriture, la compréhension de la nutrition, l'absence relative de maladies infectieuses importantes, le pouvoir d'achat des unités familiales, le logement, l'assainissement public [107].

L'amélioration des conditions de vie à travers une meilleure alimentation et des conditions d'hygiène plus satisfaisantes sont en grande partie à l'origine d'une évolution séculaire positive de la croissance, stature et poids, dès les premières années [93].

Par ailleurs, l'évolution séculaire garde son trait à caractère multifactoriel représenté par l'effet de « mobilité croissante des populations », mobilité à la fois externe et interne, engendrant un plus haut degré d'exogamie (choix de conjoint en dehors du même groupe social). Au niveau génétique, les populations humaines changent continuellement par l'intermédiaire des migrations [7].

Les études épidémiologiques de la croissance sont indispensables pour évaluer les influences de facteurs environnementaux et pour situer l'état de santé d'un individu et d'une population. En termes individuels, les enquêtes de croissance permettent de situer les enfants sortant de la normalité, aussi bien en excès qu'en insuffisance. Elles permettent d'aborder des problèmes aussi divers que celui de l'obésité, des carences nutritionnelles, des maladies ou des syndromes génétiques, des différences socio-économiques, voire même l'impact de facteurs psychologiques [7].

h. Le facteur « corpulence » = L'indice de masse corporelle

La corpulence, mot emprunté du latin « corpulentia » ou « embonpoint », est l'ampleur du corps. La forte corpulence désigne une personne de grande taille et de poids important [41]. Elle est alors le reflet de la quantité de réserves de tissu adipeux accumulées dans le corps. Elle se mesure à travers l'indice de masse corporelle (IMC) calculé à partir de la taille et du poids de l'enfant. Le suivi de la corpulence permet de détecter un excès de poids, voire un début d'obésité [148].

Chez l'enfant, la valeur de l'IMC doit être interprétée à l'aide des courbes de corpulence. Selon l'âge de l'enfant, un IMC à 20 pourra correspondre à une corpulence normale (à 16 ans par exemple) alors qu'il s'agira d'un enfant obèse s'il a 8 ans [38].

L'influence de la corpulence sur la maturation osseuse a fait l'objet de plusieurs études avec des conclusions parfois contradictoires. Plus que le surpoids en lui-même, c'est la masse graisseuse de l'individu qui semble être en cause [38].

Parmi ces études [38] :

- Benso et al., ont mis en évidence une corrélation entre la vitesse de maturation et l'IMC élevé ;
- Aicardi et al., sur un échantillon restreint, ont montré que la maturation augmentait quand l'IMC augmentait sans différencier clairement les filles des garçons ;
- En 2001, Russell et al., ont justifié l'avance de maturation des afro-américains par rapport aux américains de type « caucasien » par leur adiposité. Dans leur étude (252 enfants de 5 à 12 ans), ils trouvaient des IMC plus élevés chez les afro-américains associés à une masse graisseuse plus grande et pensaient que cette donnée constitutionnelle expliquait l'avance de maturation et la puberté plus précoce chez les afro-américains. Le tissu graisseux par son activité aromatase augmente le taux d'œstrogènes circulants et transforme les androgènes en œstrogènes. Ce sont ces phénomènes hormonaux que les auteurs mettaient en avant pour expliquer la survenue plus précoce de la puberté chez les enfants en surpoids ; bien que l'augmentation du taux d'estrogènes chez les enfants en surpoids n'est pas retrouvée dans d'autres études (Aicardi et al., Klein et al.). D'autres molécules, comme la protéine leptine (hormone sécrétée par les adipocytes pour réguler les adaptations physiologiques à un déficit énergétique) ou le GH semblent intervenir.
- En utilisant les données d'une importante étude portant sur 3000 enfants américains de 8 à 14 ans, Wang retrouvait le lien entre la corpulence et maturation osseuse mais, alors que chez les filles le surpoids entraînait une maturation avancée, chez les garçons l'avance de maturation était retrouvée pour des corpulences faibles ;
- Une étude récente de Lewis et al. portant sur une population de 139 enfants d'Afrique sub-saharienne mettait en évidence un retard de maturation net mais sans corrélation significative avec l'IMC bas de ces enfants ;
- Les jeunes filles obèses ont une avance de maturation et une puberté plus précoce (Mellits et al., 1971). La survenue d'une puberté précoce augmente le risque de surpoids à l'âge adulte (Garn et al., 1956). A contrario, les enfants présentant un IMC anormalement bas (anorexie mentale, danseuses…) ont un retard de maturation et une puberté retardée. Les mécanismes expliquant ces constatations reposent principalement sur des phénomènes hormonaux encore mal connus.

L'étude Chaumoître et al., sur la relation AO et corpulence, conclue le suivant [38]:

- Il existe une relation nette entre la corpulence et la maturation osseuse, quel que soit le sexe. La maturation osseuse est liée à la corpulence, avec une corrélation nette entre AO et IMC : l'augmentation de la maturation osseuse est liée à l'augmentation de l'IMC ;

- Un IMC élevé est associé à une avance de maturation ;
- Une évolution progressive allant d'un retard de maturation chez les enfants en insuffisance pondérale à une avance de maturation chez les enfants en surpoids ;
- Il existe une différence significative entre la corpulence des garçons et celle des filles, en faveur des filles. Cette différence est très probablement la conséquence de plusieurs facteurs mêlant le culturel, l'alimentation et l'activité physique : les pays du Maghreb valorisent un modèle féminin du corps avec des formes généreuses bien que cette donnée soit en régression ; en plus, l'augmentation de corpulence des filles et l'écart avec les garçons sont marqués après l'adolescence, période à partir de laquelle l'activité physique des garçons est nettement plus importante que celle des filles ;
- La corpulence plus élevée des filles peut être une des explications à leur maturation plus avancée que celle des garçons alors qu'il n'y a pas de différence de niveau socio-économique selon le sexe.
- Les enfants en insuffisance pondérale (IMC < 3ème percentile) ont un retard de croissance et ce retard est moins marqué chez les enfants dont l'IMC est entre le 3ème et le 50ème percentile. A l'opposé, les enfants obèses ont une avance de maturation alors que les enfants dont l'IMC est entre le 50ème et le 97ème percentile ont une bonne corrélation avec le GP ;
- La corpulence augmente avec le niveau social et l'obésité touche principalement les enfants favorisés alors que les insuffisances pondérales sont l'apanage des enfants défavorisés ;
- Le lien entre corpulence et niveau socio-économique, met en lumière l'intrication et le caractère multiple des facteurs influençant la maturation osseuse qui peuvent agir en synergie : le niveau socio-économique et la corpulence favorisent la maturation et concernent le même type de population. Il est très intéressant de noter que l'obésité, dans un pays développé comme la France, est fortement liée au niveau socio-économique avec une prévalence élevée de l'obésité dans les couches sociales défavorisées (de Peretti, 2004).

i. Le facteur « pathologie » = Les maladies, les anomalies et les traumatismes

Plusieurs pathologies affectent la maturation squelettique, citons par exemple [88]: la pathologie endocrinienne, les infections, les malformations congénitales et les traumatismes.

- **<u>Les maladies :</u>**
  - **La pathologie endocrinienne (endocrinopathies) :**

    Se présentent par des troubles hormonaux tels : l'hypothyroïdie, l'insuffisance antéhypophysaire, l'hyperplasie congénitale des surrénales. Plusieurs anomalies de croissance peuvent être évoquées,

en rapport avec une hypothyroïdie ou hypercorticisme (enfants de petite taille et retard de puberté), ou en rapport avec une hyperthyroïdie ou une hypersécrétion de GH avec un adénome hypophysaire (enfants de grande taille et puberté précoce) [87].

Les déficits en GH peuvent être congénitaux ou acquis, notamment en cas de tumeur cérébrale. Ils se traduisent par une petite taille harmonieuse, parfois associée à des signes tels qu'une adiposité, un visage poupin, des anomalies de la ligne médiane. Le dosage de la GH, notamment lors de tests de stimulation, permet de poser le diagnostic [87].

- **Les infections :**

  Les infections ostéo-articulaires de l'enfant altèrent la croissance, elles se présentent sous plusieurs formes :

  . Les arthrites aiguës : engendrent une inflammation avec hyperplasie synoviale et production de protéases et cytokines entraînant une destruction du cartilage, une lyse osseuse sous-chondrale, et une hyperpression intra-articulaire responsable d'une ischémie locale accélérant la destruction de l'articulation [100].

  . Les ostéo-arthrites : elles sont d'origine hématogène, expliquées par la riche vascularisation des os en croissance, particulièrement au niveau de la métaphyse des os longs. L'infection entraîne une ostéo-thrombophlébite septique métaphysaire responsable d'une ischémie locale avec nécrose osseuse et création de séquestres osseux. La destruction du cartilage de conjugaison peut être à l'origine de troubles de croissance des os longs. Après 2 ans, la disparition des anastomoses métaphyso-épiphysaires limite le risque d'extension à l'articulation.

  . Les Ostéomyélites aiguës : caractérisées par l'apparition d'une inflammation locale. Une boiterie, un refus de la marche ou une pseudo-paralysie doivent faire évoquer le diagnostic. L'atteinte prédomine sur les métaphyses des os longs en période de croissance : épaule, poignet, genou, « proche du genou et loin du coude ».

- **La maladie cœliaque :**

  Les enfants patients avec une maladie cœliaque présentent des signes et des symptômes de malabsorption, comprenant les diarrhées, la stéatorrhée, l'anémie ferriprive et une perte pondérale ou un retard de croissance. La croissance et le développement se normalisent sous un régime sans gluten. Bon nombre de

complications dues à la maladie cœliaque peuvent être évitées sous un tel régime strict [13].

- **<u>Les malformations congénitales et anomalies chromosomiques :</u>**

  Les malformations congénitales, ou troubles congénitaux, font partie de la « Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes » (CIM). On peut les définir comme des anomalies de structure ou de fonction présentes à la naissance [115].

  L'anomalie malformative peut concerner un membre en totalité, les plus fréquentes sont les ectromélies (absence ou aplasie des membres), notamment l'ectromélie longitudinale externe qui affecte le membre pelvien, avec agénésie de la fibula. Ce type de malformation est dit à pourcentage constant, c'est-à-dire que le pourcentage d'inégalité va être conservé jusqu'à la fin de la croissance. Cela permet des prévisions d'inégalité de longueur tout à fait fiables [87].

  Dans d'autres cas, il n'y a pas de malformations évidentes associées, mais essentiellement une inégalité constitutionnelle qui fait généralement parler d'hémihypertrophie d'un membre. Dans cette hypothèse, il convient de vérifier l'absence d'étiologie, notamment sous la forme d'une tumeur rénale. Lorsque cette hémihypertrophie est d'origine idiopathique, c'est également dans de telles circonstances que les abaques et courbes prévisionnelles ont toute leur importance afin d'établir le moment opportun pour réaliser une épiphysiodèse [87].

  Les troubles de croissance peuvent parfois concerner l'ensemble de l'hémicorps, la problématique reste la même et dans ce cas également, une prévision rigoureuse doit être faite à partir des abaques. Ces prévisions doivent être répétées dans le temps [87].

  Autres anomalies chromosomiques responsables de gigantisme infantile doivent être systématiquement évoquées, notamment le syndrome de Marfan lorsqu'il s'associe à une hyperlaxité ligamentaire, une scoliose, des antécédents familiaux. Un bilan ophtalmologique et cardiaque s'imposent afin d'étayer le diagnostic. D'autres syndromes plus rares peuvent être évoqués, tel que le syndrome de Klinefelter [87].

- **<u>Les traumatismes :</u>**

  Les traumatismes qui affectent le cartilage de croissance et donc la maturation osseuse sont multiples et de plusieurs types [87] :

  - **Traumatismes à distance du cartilage de croissance** [87] **:**

    La fracture osseuse chez l'enfant intervient à une période au cours de laquelle règne une activité métabolique intense, et où le cartilage de croissance va être susceptible de modifier de façon significative le résultat initial obtenu dans les suites du traumatisme. Les modifications d'activité métabolique locales et régionales vont

parfois modifier la vitesse de croissance du segment osseux considéré et provoquer une poussée de croissance excessive. En effet, La survenue d'une fracture sur un os en croissance est à l'origine d'une stimulation de la croissance. Cela s'observe de façon constante, mais à des degrés variables. Cet effet est significatif durant les 2 ans qui suivent le traumatisme et peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 30 mm. Les conséquences sont peu importantes au membre thoracique. En revanche, elle peut engendrer aux membres pelviens des inégalités de longueur de membres dont la famille doit être avertie. La poussée de croissance est fortement corrélée au type de traitement (maximale avec les ostéosynthèses par plaque, minimale dans les traitements orthopédiques). Enfin, elle est peu marquée dans les enclouages centromédullaires élastiques stables.

- **Traumatismes par séparation en bloc de la chondroépiphyse (décollement épiphysaire)** [87] **:**
  Il s'agit des décollements épiphysaires tels qu'ils sont décrits dans la classification de Salter sous les formes de type Salter 1 et 2. Les travaux expérimentaux confirment les données de la clinique. Lorsqu'il s'agit de traumatismes en traction ou flexion, l'unité vasculaire de la chondroépiphyse n'est pas concernée. La couche de réserve est intacte. Le trait de fracture passe par la zone avasculaire de la couche hypertrophique. Le pronostic est donc tout à fait bon. On ne peut cependant jamais éliminer une contusion associée, notamment lorsque survient un traumatisme en compression qui altère la couche de réserve. Cela justifie le principe de surveillance systématique à long terme de toute fracture de l'enfant.
- **Traumatismes directs du cartilage de croissance** [87] **:**
  Ce sont des traumatismes altérant la couche de réserve du cartilage de croissance et le régime vasculaire épiphysaire. Le risque est majeur de voir survenir des lésions irréversibles. On peut distinguer trois types de lésions [87] :
    - les épiphysiodèses post-traumatiques : certaines sont purement mécaniques avec une section du cartilage de croissance. D'autres sont à la fois mécaniques et vasculaires lors de compression ou de contusion [87] ;
    - les épiphysiodèses post-infectieuses : fréquentes, elles se caractérisent par la survenue à un âge précoce dans la suite des ostéo-arthrites infectieuses. Les conséquences sont alors majeures surtout lorsqu'il s'agit de lésions multifocales [87] ;
    - les lésions observées lors des purpuras fulminans : on peut y rattacher des lésions observées lors des purpuras fulminans qui

sont à la fois infectieuses et vasculaires et pour lesquelles les atteintes sont multiples souvent très étendues [87]. Le purpura fulminans donne non seulement des lésions d'ischémie nécessitant des amputations à la phase aiguë de la maladie, mais aussi une atteinte des zones de croissance pouvant aller jusqu'à une stérilisation complète de l'ensemble des cartilages de conjugaison (petite taille). Ceci pose le problème ultérieur après la phase aiguë, de déviation d'axe et d'inégalité de longueur. Les problèmes orthopédiques risquent de se poser tout au long de la « croissance » [61].

3. Intrication des facteurs :

En réalité, ces facteurs qui influencent la maturation squelettique se caractérisent par un démembrement difficile et un enchevêtrement remarquable [87], ce qui rend les paramètres de croissance correspondant à un modèle multifactoriel sous l'influence de facteurs génétiques et mésologiques [7].

(1) Au niveau génétique, des études longitudinales de la croissance dans des échantillons de jumeaux ou des échantillons familiaux ont clairement démontré que le rythme de croissance est déterminé génétiquement (Hauspie et coll., 1982 ; Sharma, 1983 ; Mueller, 1986 ; Byard et coll., 1993 ; Hauspie, 1998). Ainsi, une étude de Hauspie et coll. (1994) sur des jumeaux monozygotes et dizygotes montre une composante génétique importante, en particulier dans la variation de l'âge au pic de croissance pubertaire. L'influence génétique peut être évaluée par un cœfficient d'héritabilité (proportion de la variation due aux facteurs génétiques par rapport à la variation totale). Cependant, dans l'examen des relations familiales, à la composante génétique s'ajoute la transmissibilité culturelle et mésologique [7].

(2) L'influence des conditions mésologiques est aussi abondamment illustrée. Dans des conditions de vie médiocre, la croissance et le développement peuvent être freinés, pour permettre ainsi à l'enfant de mieux répondre à ses besoins physiologiques et métaboliques. Lorsque les conditions environnementales s'améliorent, on observera une période de croissance de rattrapage jusqu'au moment où la trajectoire originale de sa croissance est à nouveau atteinte (Tanner, 1986 ; Golden, 1998). Mais si la période de stress dure trop longtemps, la croissance répondra à un modèle de maturation tardive. Les exemples sont nombreux, que ce soit pour des raisons de malnutrition chronique mais légère (Hansen et coll., 1971), des raisons médicales de maladies chroniques comme l'asthme (Hauspie et coll., 1977 et 1979), des raisons de stress psychosocial (Widdowson, 1951 ; Powell et coll., 1967 ; Skuse, 1998), des raisons de milieu familial socialement défavorisé (Bielicki, 1986), ou encore chez des enfants vivant à haute altitude (Malik et Hauspie, 1986). Résultat : « Tous ces enfants sont légèrement en retard pour atteindre leur poussée de croissance pubertaire, la maturation sexuelle et la taille finale. Au contraire, la taille finale n'est, en moyenne, pas réduite (c'est-à-dire

conforme à la moyenne de la population), sauf si les conditions contraignantes sont trop sévères (Froment, 1986 ; Tanner, 1986) » (Hauspie, 2003) [7].

En conclusion, l'action conjuguée d'un certain nombre de facteurs environnementaux (pouvoir d'achat de la famille, dimension de la famille, conditions sanitaires, milieu pathogène et accès aux soins médicaux, soins apportés à l'enfant et ambiance psycho-affective, qualité du régime alimentaire, habitudes liées à l'origine géographique et aux traditions familiales) est susceptible d'avoir une influence sur la croissance des enfants et des adolescents. L'immigration envisagée sous ses aspects anthropo-biologiques est un domaine encore peu exploré : les travaux portant sur la croissance des enfants des migrants, sur leur alimentation et leur santé, sont rares, mais indispensables [7].

Ce qui est confirmé maintenant, que les mécanismes de régulation de la croissance sont complexes : génétiques, socio-économiques, endocriniens et mécaniques, et il est difficile de les dissocier [87]. Les difficultés socio-économiques et nutritionnelles peuvent entraîner un retard de maturation et donc une sous-estimation de l'AR [88] : il est connu que par exemple une carence alimentaire, des troubles hormonaux et certaines maladies ont des conséquences sur la croissance des os. C'est pourquoi de tels facteurs doivent être pris en considération [54].

Impacts des différents facteurs sur les périodes de la croissance :

L'intrication des facteurs influençant la maturation et la croissance des enfants et adolescents se voient aussi pendant les périodes de la croissance [27] :

- La croissance fœtale intra-utérine : elle est rapide (50 cm en neuf mois), et elle est peu influencée par les facteurs génétiques (tailles parentales) mais surtout par les apports nutritionnels du placenta, l'insuline et l'IGF-2 ;
- La croissance postnatale de 0 à 4 ans : elle est marquée par la diminution de l'influence des facteurs intra-utérins au profit des facteurs génétiques, de la nutrition et des facteurs hormonaux (hormones thyroïdiennes, puis GH) ;
- La croissance de 4 ans à la période pubertaire : elle est sous l'influence importante de la génétique (notion de couloir de croissance), de l'axe somatotrope et des hormones thyroïdiennes. Normalement, la croissance doit se faire régulièrement et être située dans le couloir de croissance génétique ;
- La croissance pubertaire : elle est largement dépendante des stéroïdes sexuels, en plus des facteurs cités précédemment.

Au total :

L'enfant est un sujet en période de croissance. Le déroulement de chacun de ses processus dépend d'une multiplicité de facteurs qui induisent une grande variabilité interindividuelle dans une population mais cette variabilité ne masque pas les grandes tendances d'une population d'où la recherche de « standards », de « fourchettes » pour situer un individu par rapport aux autres d'une même population et pour prévoir son avenir [127].

CHAPITRE II :
L'IMAGERIE ET L'ÉTUDE DE LA MATURATION OSSEUSE

« ... ce sont donc toutes les articulations des membres qui ont été prioritairement mises à contribution pour évaluer la maturation osseuse »

Professeur Michel SEMPÉ
Atlas de la maturation squelettique, 1979

II.1. La place des articulations des membres dans l'étude de la maturation osseuse chez l'enfant et l'adolescent

II.2. La place de l'imagerie dans l'appréciation de la maturation du squelette appendiculaire humain

II.3. L'anatomie radiologique des structures ostéo-articulaires des membres et leurs aspects évolutifs en postnatal

II.1. La place des articulations des membres dans l'étude de la maturation osseuse chez l'enfant et l'adolescent

Ce chapitre est dédié à la Radiologie. Sans elle, l'évaluation de la maturation squelettique n'aurait pas eu de sort : en parlant de ces mystérieux Rayons X, « il n'est pas inutile de rappeler que la découverte de ces rayons date de quatre-vingt-quatre ans seulement puisque ROENTGEN radiographia la propre main de sa femme le 8 novembre 1895. Sans cet apport inestimable, la maturation squelettique explorée par les anatomistes n'aurait aucune application pratique pour la surveillance et la prévention » [139].

Dans ce bref chapitre, consacré aux structures ostéo-articulaires (os, osselets, épiphyses, sésamoïdes...) du squelette appendiculaire, étant donné la « priorité » de «toutes les articulations des membres mises à contribution pour évaluer la maturation osseuse » [139], on insistera sur deux types de description. D'une part, sur la description anatomique de « l'aspect radiologique adulte » de ces structures ostéo-articulaires, qui sont considérées et utilisées comme substratum anatomique où se passent les évènements de la maturation osseuse chez l'enfant et l'adolescent et où cette maturation doit être évaluée ; et d'autre part, sur la description des « aspects radiologiques évolutifs », durant la croissance postnatale, des mêmes structures ostéo-articulaires, en exposant quelques degrés importants de la maturation squelettique. Tous ceci et cela, avec une iconographie radiologique numérique.

Nous abordons un aperçu sur l'anatomie radiologique de quelques os et articulations, des parties non ossifiées, des centres d'ossification et des épiphyses non fusionnées… il va être, sûrement, utile lors de l'évaluation de la maturation squelettique et la recherche de l'âge osseux (AO).

Cette étude va s'intéresser aux articulations concernées par les méthodes d'estimation de l'AO, qui sont : l'épaule, le coude, le poignet, la main, le bassin, la hanche, le genou, la cheville et le pied.

Une attention est faite pour un os et non une articulation, c'est la clavicule, os de membrane, dont son ossification fait exception et son étude est utilisée surtout en pratique médico-légale [4, 62] ; de même aussi que la crête iliaque qui est utile en fin de croissance [4], et dont son étude est considérée comme méthode d'affinement de l'AO en période pubertaire [32].

II.2. La place de l'imagerie dans l'appréciation de la maturation du squelette appendiculaire humain

L'imagerie médicale regroupe l'ensemble des techniques utilisées par la médecine pour le diagnostic mais aussi le traitement d'un grand nombre de pathologies. Elle a révolutionné la médecine en donnant un accès immédiat et fiable à des informations jusqu'alors « invisibles » au diagnostic clinique, comme les caractéristiques anatomiques, ou certains aspects du métabolisme (imagerie fonctionnelle) des organes [50].

Les techniques d'imagerie médicale ne donnent pas une simple « photographie » du tissu ou de l'organe étudié mais une représentation visuelle fondée sur des caractéristiques physiques ou chimiques particulières. Avec des appareillages utilisés qui sont aussi variés que les techniques elles-mêmes… une « variété de complémentarité » des techniques les unes des autres [50].

a. <u>Brève histoire de l'imagerie médicale</u> [50]

La première technique d'imagerie médicale, la radiographie est née à la fin du 19ème siècle grâce aux travaux de Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), un physicien allemand. Les rayons X venaient d'être découverts, permettant de voir à l'intérieur du corps humain sans avoir besoin de l'ouvrir. Depuis, de nombreuses améliorations ont été apportées à ce principe révolutionnaire, jusqu'à la « radiographie » aux rayons X telle que nous la connaissons aujourd'hui. L'apport de l'informatique et du traitement numérisé des images a abouti à la mise au point du scanner en 1972 par les radiologues britanniques Allan Mc Cornack (1924-1998) et Godfrey N. Hounsfield (né en 1918).

À côté des rayons X, d'autres principes physiques ont été découverts tout au long du XXème siècle, inspirant, souvent de nombreuses années après, de nouvelles techniques d'imagerie médicale.

Ainsi, la propagation des ultrasons était utilisée par les SONAR (SOund NAvigation Ranging) dès 1915 (pour détecter les icebergs suite au naufrage du Titanic) ; c'est un demi-siècle plus tard (en 1955) qu'Inge Edler (1911-2001), un cardiologue suédois, a eu l'idée de mettre au point sur ce principe l'échographie pour diagnostiquer les sténoses mitrales.

La résonance nucléaire (des noyaux des atomes) soumis à un champ magnétique a été découverte en 1945 par les physiciens américains Edward Purcell et Felix Bloch ; c'est en 1973 que le chimiste américain Paul C. Lauterbur obtient, chez un animal, le premier cliché en imagerie par résonance magnétique.

Enfin, la découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie en 1898, puis de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934, ont conduit au développement de la médecine nucléaire, avec la scintigraphie dans les années qui suivent.

b. L'imagerie au profit de la croissance et de la maturation

Face aux importantes variations individuelles, de la taille par exemple comparée à l'âge chronologique, ou de l'âge d'apparition des premiers signes de puberté, la recherche d'un paramètre plus précis permettant d'évaluer l'âge biologique s'était révélée indispensable. Le degré de maturation du squelette se présente comme une valeur de référence relativement précise pour mesurer l'âge physiologique et un index très utile en pédiatrie [139].

L'apport de l'imagerie médicale dans l'appréciation du développement et de la maturation du squelette humain est incontournable ; de nombreux examens d'imagerie aident énormément à l'évaluation de cette maturation osseuse, tels : la radiographie standard, l'échographie, la TDM, l'IRM et la scintigraphie osseuse.

c. La notion de radioprotection

La radioprotection désigne les mesures de protection de l'homme et de son environnement contre les effets dangereux des rayonnements ionisants.

Depuis plus d'un siècle, la médecine fait appel, tant pour le diagnostic que pour la thérapie, à des rayonnements ionisants produits par des générateurs électriques ou par des radionucléides. Ces techniques représentent la deuxième source d'exposition de la population aux rayonnements ionisants, après l'exposition aux rayonnements naturels, et la première source d'origine artificielle [11].

De point de vue exposition en milieu médical, et de façon général, quatre catégories sont exposées, directement ou indirectement, aux rayonnements ionisants : d'une part, les patients qui bénéficient d'un acte diagnostique ou thérapeutique utilisant des rayonnements ionisants, et d'autre part, le personnel ou travailleurs, le public et l'environnement, pour lesquels il n'y a pas de bénéfice direct [11].

Le système de radioprotection est basé sur trois principes qui s'appliquent simultanément [108] :

- Le principe de justification : l'utilisation de rayonnements ionisants doit être justifiée par des avantages économiques, sociaux ou autres par rapport aux dommages sanitaires qu'ils sont susceptibles de provoquer ;
- Le principe d'optimisation : toutes les expositions doivent être maintenues au niveau le plus faible raisonnablement possible (principe « ALARA », qui signifie « As Low As Reasonably Achievable »), compte tenu des facteurs économiques et sociaux ;
- Le principe de limitation des doses : la somme des doses reçues par une même personne ne doit pas dépasser les limites réglementaires. Ce principe.

Ce dernier principe, n'est pas décliné pour les applications médicales [108], il ne s'applique pas aux patients, du fait de la nécessité d'adapter la dose délivrée à l'objectif diagnostique ou thérapeutique [11].

Parmi les différents aspects des activités nucléaires, on cite en particulier « les activités nucléaires à finalité diagnostique », comme la scanographie, la radiologie conventionnelle, la radiologie dentaire et la médecine nucléaire diagnostique, qui

contribuent à l'exposition de la population liée aux actes de diagnostic médical, par la fréquence de leur utilisation [11].

A titre de rappel, la radioactivité est mesurée par trois unités principales : (1) le **Becquerel (Bq)**, qui est l'unité internationale de mesure de l'activité d'un radionucléide ; (2) le **Gray (Gy)**, qui est surtout utilisé en radiothérapie pour mesurer la quantité d'énergie délivrée par un rayonnement ; et (3) le **Sievert (Sv)** ou son sous multiple, le millisievert (mSv = 0,001 Sv), qui est une unité de mesure utilisée en radioprotection [84].

Sur le tableau 3, sont représentées les doses efficaces moyennes pour différents examens radiographiques des différentes régions anatomiques [108].

Tableau 3 : Les doses efficaces moyennes pour les différents examens radiographiques [108]

Examens radiologiques	Dose efficace moyenne (mSv)	Nombre équivalent de clichés thoraciques	Durée équivalente d'exposition naturelle
Membres et articulations	< 0,01	< 0,5	< 1,5 jour
Thorax (1 cliché postéro-antérieur)	0,02	1	3 jours
Crâne	0,07	3,5	11 jours
Rachis dorsal	0,7	35	4 mois
Rachis lombaire	1,3	65	7 mois
Hanche	0,3	15	7 semaines
Bassin	0,7	35	4 mois
Abdomen sans préparation	1,0	50	6 mois
Urographie intraveineuse	2,5	125	14 mois
Transit gastro-duodénal	3	150	16 mois
Lavement baryté	7	350	3,2 ans
Scanographie crânienne	2,3	115	1 <an
Scanographie thoracique	8	400	3,6 ans
Scanner abdomino-pelvien	10	500	4,5 ans

© National Radiological Protection Board

1. LA RADIOGRAPHIE STANDARD :

Le 8 novembre 1895, lorsque Roentgen radiographiait la main de sa femme, il ne se doutait probablement pas qu'il ouvrait une voie aux conséquences incalculables [127]. En effet, la radiographie standard, est maintenant l'examen de choix et de première intention du squelette appendiculaire, lors d'apparition des points d'ossification épiphysaire et leur augmentation de volume [87].



Figure 16 : La première radiographie (la main de madame Röntgen et sa bague), en 1895
First_medical_X-ray_by_Wilhelm_Röntgen_of_his_wife_Anna_Bertha_Ludwig's_hand_-_18951222.gif

Dans son fonctionnement, la radiologie crée une image en faisant passer des radiations à travers le corps depuis une source extérieure [149], ce genre de radiographie n'est qu'une représentation bidimensionnelle d'une réalité tridimensionnelle [67]. En fait, toutes les techniques radiographiques standard ont pour limite la représentation bidimensionnelle de structures tridimensionnelles, l'image radiographique traditionnelle traduit le niveau d'absorption des tissus traversés par le rayon X [149]. En imagerie médicale, la radiographie « traditionnelle » du squelette, a permis d'étudier la croissance normale et ses déviations, de prévoir la croissance d'un individu [127], et de déterminer l'AO [56].

a. Le principe de la radiographie : le déroulement d'une « capture »

La radiologie « analogique » conventionnelle est une technique d'imagerie médicale qui permet d'obtenir à l'aide des rayons X, des images à partir des structures internes de l'organisme à des fins diagnostiques. Ces images traduisent l'atténuation des flux de photons X par la matière irradiée [82].

Le passage « nuancé » des rayons X :

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques, ont la propriété d'être atténués par toutes sortes de substances, y compris les liquides et les gaz. Ils peuvent traverser le corps humain, où ils seront plus ou moins atténués suivant la densité électronique des structures traversées [50]. Les rayons résiduels, ceux qui auront traversé le corps, provoquent le noircissement du film placé derrière la table de radiographie. Ainsi, une structure « aérée » comme celle des poumons paraîtra noire. À l'inverse, une structure dense comme les os paraîtra blanche, puisque les rayons X auront tous été absorbés [50].

Les rayons X traversent les tissus mous ou non ossifiés (non mâtures) sans être arrêtés et impressionnent le film qui devient plus ou moins noir ; en revanche, ces

rayons n'atteignent pas le film se trouvant derrière les os qui apparaissent de la sorte en blanc ou bigarrés. Le cliché radiographique est un « Négatif » ; à l'inverse, le tirage d'une photographie « Positive » montrera les os plus ou moins gris [135].
La physe étant cartilagineuse se comportera comme un tissu mou et sa disparition sera son ossification totale [135], et ne visualisant sur les clichés radiographiques que les tissus du squelette, c'est-à-dire les cartilages de croissance déjà ossifiés [53].

La qualité de réalisation :

Pour évaluer l'âge osseux, sur la base de radiographie du poignet, la qualité de la radiographie et la technique de réalisation doivent être irréprochables (Bowden). Tanner et coll., pendant leur travail, trouvaient un taux de rejet d'environ 15% de radiographies, non exploitables à cause d'une mauvaise visualisation de l'épiphyse distale du radius et de l'ulna due à des erreurs techniques [67].
Une sous exposition de la radiographie peut rendre celle-ci inexploitable pour un traitement informatisé de l'évaluation de l'âge, une mauvaise technique d'exposition (distance foyer-film, kilo-Voltage, milli-Ampérage, durée d'exposition) ou une légère rotation du poignet altère grandement l'évaluation [67].
Il est généralement recommandable, pour la main et le poignet, comme d'une façon générale pour toutes les régions peu épaisses du squelette, d'utiliser des films sans écran qui donnent des images d'une finesse et d'une richesse de détails incomparables. Les contours des métacarpiens et des phalanges, les interlignes articulaires se détachent avec une grande netteté [137].

b. De la radiographie « Analogique » à la radiographie « Numérique »

Parmi les aspects de l'évolution de l'imagerie médicale, ceux qui concerne les progrès technologiques majeurs réalisés en Radiologie Conventionnelle Numérique, où les films étant appelés à disparaître [17, 82].



Figures 17 et 18 : Deux radiographies de l'épaule. A gauche, un cliché analogique (Orthopedie Amiens Docteur Menciere Chirurgien**). A droite, un cliché numérique (http://onclepaul.fr/wp-content/uploads/2011/07/Incidences-du-membre-superieur-en-radiographie-standard-Partie-1-La-ceinture-scapulaire.pdf)**

Grâce à l'ordinateur couplé aux rayons X et mis au cœur du procédé permettant l'acquisition des données, on était passé d'une image analogique comparable à une photographie à une image numérique « fabriquée » par un ordinateur [17].

La radiographie analogique : les débuts d'une technique

La première technique d'imagerie médicale, la radiographie, est née à la fin du 19ème siècle grâce aux travaux d'un physicien allemand, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) [50].



Figure 19 : Wilhelm Conrad Röntgen
(https://elgrupofiesta.pe/wp-content/uploads/2019/11/Roentgen-W-C.jpg)

Depuis cette découverte, des objets et des êtres étaient devenus « transparents » et permettant de voir à l'intérieur d'un corps humain sans avoir besoin de l'ouvrir : la radiologie était née [17, 50].

L'équipement principal en radiologie « analogique » se compose : (1) d'une source à rayons X, le tube et le générateur, (2) d'un détecteur ou récepteur, le traditionnel couple écran-film (écran scintillateur et film radiologique) contenu dans une cassette, et (3) d'un système de traitement de l'image, le film doit être développé par un procédé chimique pour révéler l'image à interpréter [14, 82].

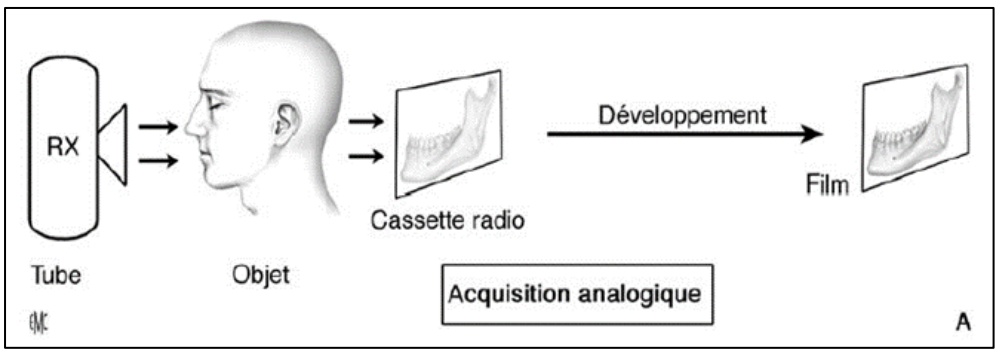


Figure 20 : La formation de l'image analogique (https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/2672/1/MEMOIRE%20FINALE.pdf)

La radiographie numérique : une « Anatomie » de qualité

L'apport de l'informatique et du traitement numérisé des images a abouti à la mise au point d'une radiographie dite « numérique » [50].

L'équipement principal de la radiologie « numérique » se compose aussi : (1) d'une source à rayons X, le tube et le générateur, (2, 3) d'un détecteur ou récepteur, où les films radiographiques peuvent être remplacés par des « détecteurs électroniques », dont les différents points, stimulés ou non par les rayons résiduels, permettent une numérisation et donc un traitement informatique des images obtenues en radiographie [14, 50, 82].

L'évolution de la radiologie conventionnelle donc, consiste en la numérisation des images produites par remplacement de ce récepteur écran-film par un récepteur qui permette cette numérisation [14]. Cette révolution technologique est née du couplage de l'ordinateur à des technologies basées sur l'utilisation des rayons X. Le résultat fut le passage de l'image analogique à l'image numérique [17, 82].

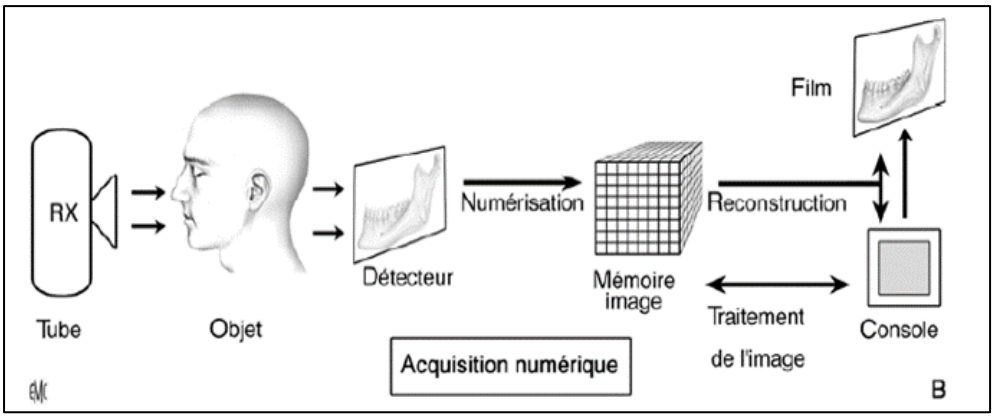


Figure 21 : La formation de l'image numérique (https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/2672/1/MEMOIRE%20FINALE.pdf)

« L'homme n'était plus seulement transparent. Les images générées par les ordinateurs permettaient désormais de voyager littéralement dans son anatomie » [17].

Les avantages de la radiologie numérique :

De manière générale, par rapport à la radiologie traditionnelle sur film, la radiologie numérique a permet :

- d'obtenir une meilleure qualité d'image [82, 151] grâce aux possibilités offertes par le filtrage numérique [151] ;
- de donner accès à plus d'information, par la meilleure résolution de contraste [82, 151]. Les appareils peuvent faire le post-traitement des images (rehaussement du contraste et contours) [14, 151] ramené à des milliers de niveaux de gris, entre 4000 (12 bits) et 65000 (16 bits) niveaux de gris, accessibles à l'œil de manière optimisée suivant l'information recherchée [151] ;



Figure 22 : Le post traitement de l'image radiologique [46]

- de visualiser les images numériques directement sur un ou différents moniteurs, de les stocker et de les transmettre instantanément, même à distance, à une autre structure pour interprétation, par l'intermédiaire d'un réseau informatique (téléradiologie) [14, 82, 151]. En effet, les images numériques sont archivées et font partie d'un système de stockage électronique de plus en plus courant dans le monde, le PACS (Picture Archiving and Communication System). Le PACS permet de rechercher des images au moyen d'un réseau électronique permettant la visualisation à distance d'images et de rapports, par exemple d'un autre hôpital. Le dossier électronique du patient, où toutes les informations concernant le patient sont stockées, qui se développe rapidement, est de plus en plus accepté ; il améliore grandement le traitement des données [149].
- de diminuer le besoin de reprise de l'examen et les doses d'exposition du patient [14] ;
- de se passer des consommables et des produits chimiques de développement [14, 151] ;
- de copier le format numérique des clichés et d'en fournir un exemplaire au propriétaire (imprimé, sur CD ou DVD…) et d'en garder une copie (archivage électronique) sur disque dur, DVD, internet… [82] ;
- de faciliter aussi le suivi des cas, les clichés peuvent être vite retrouvés et comparés à de nouveaux clichés sur le même écran [82] ;
- enfin, la radiographie numérique est une technologie propre, car les déchets chimiques qui proviennent du développement des films et qui peuvent causer de sérieux dommages à l'environnement, sont totalement supprimés. De plus, le technicien n'a plus le désagrément de devoir travailler dans une chambre noire [82].

Cette innovation vers le numérique doit être exploitée dans un examen de grande importance, de diagnostic et de suivi, à intérêt médical et médico-légal, quelquefois décisif : c'est l'examen d'estimation de la maturation squelettique.

c. L'os, le processus de maturation osseuse et leur « traduction radiologique »

Le principe général du processus de la maturation squelettique est lié au fait qu'à la naissance, aucune des épiphyses des os longs n'est visible sur une radiographie centrée sur une articulation et qu'à la fin de l'adolescence, toutes ces épiphyses s'étant fusionnées aux métaphyses [135].

Le terme « métaphyse » est défini de deux manières : anatomiquement, c'est l'extrémité en croissance active de la diaphyse, une bande en plaque de cartilage appelée le cartilage de croissance [95, 96] ; radiologiquement, le terme comprend le cartilage calcifié d'un disque épiphysaire et l'os récent formé au-dessous [69].

L'ossification du « modèle » cartilagineux du squelette débute au niveau des points bien précis, dits « points d'ossification » qui se distinguent en : (1) « point d'ossification primaire », qui se forme en prénatal, dans la diaphyse des os longs, puis s'étend progressivement vers les extrémités de l'ébauche. A la naissance, les diaphyses des os long sont complètement ossifiées, alors que les épiphyses sont encore cartilagineuses ; et (2) « point d'ossification secondaire » : qui apparait en postnatal, au centre des os courts (tels les os du carpe) et au niveau des épiphyses, ces structures s'ossifient progressivement à des âges variés [90, 91, 95, 96, 120, 125]. Par ailleurs, sur les os longs, une bande de cartilage située entre l'épiphyse et la métaphyse persiste, le « cartilage de croissance », permette la croissance en longueur des os et la fusion épiphyso-diaphysaire une fois la croissance du corps s'achève, à l'âge adulte, et les os atteignent leur longueur définitive [95, 96, 120].



Figure 23 : Aspect du fémur distal d'un enfant affecté d'une arthrite chronique juvénile. Les injections successives de bisphosphonates ont laissé chaque injection un liseré calcique. L'aspect montre le principe de croissance en longueur par appositions osseuses successives [87]

Les diaphyses n'interviennent pas directement au processus de la maturation, bien qu'elles interviennent, indirectement et fondamentalement, par le paquet vasculo-nerveux qu'elles canalisent. Pendant ce processus, leur longueur s'accroît d'autant que le cartilage d'accroissement ou physe demeure actif, provoquant dépôts après dépôts au niveau de la métaphyse. Quand cette activité cesse, la croissance s'interrompt et ce n'est jamais brutalement, mais plutôt très progressivement [135].
Fréquemment, chez l'enfant, on trouve des lignes transverses de radio-opacité augmentée près des lignes épiphysaires, dans la diaphyse des os longs. Ces lignes transverses sont produites par des strates transversales de l'os. Ces couches résultent d'un arrêt temporaire de la maturation cartilagineuse, peut-être dû à une maladie aigüe ; pendant ce temps, les ostéoblastes continuent à former du tissu osseux en une couche horizontale, plutôt que de la manière habituelle. Ce ne sont pas des lignes d'arrêt de la croissance [69].
Dans beaucoup d'os jeunes, les parties non calcifiées des épiphyses peuvent se voir sous forme de bandes radio-transparentes irrégulières, ou dites lignes épiphysaires. Quand une ligne épiphysaire n'est plus visible, on dit qu'elle est fermée : la diaphyse et l'épiphyse ont alors fusionné ou soudées. L'aspect radiographique de la soudure précède la disparition du disque épiphysaire, encore visible sur l'os sec [69].
Au total, le processus de maturation est évident dans toutes les parties du squelette, mais c'est dans la transformation des tissus fibreux et cartilagineux en tissu osseux, que les critères les plus aisément reconnaissables se présentent. En effet, le squelette va passer lentement d'un état cartilagineux radio-transparent à un état osseux radio-opaque. Lorsque l'on compare la radiographie du poignet à la naissance et à l'âge adulte (fig. 24), toutes les structures osseuses radio-opaques à l'âge adulte étaient en fait déjà présentes à la naissance, mais sous la forme de maquettes cartilagineuses immatures, radio-transparentes [23].

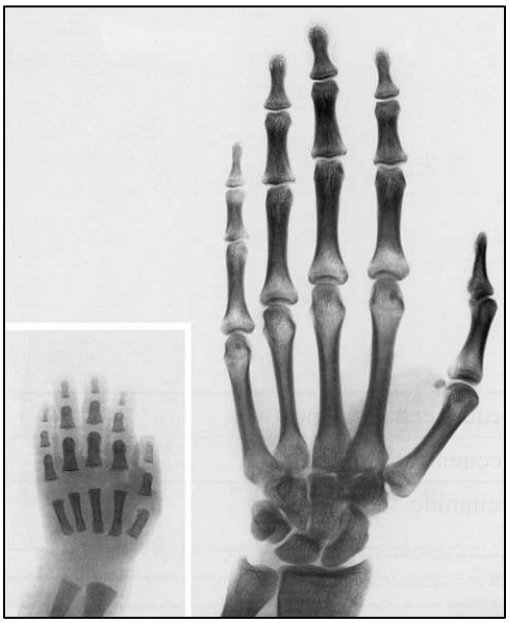


Figure 24 : Radiographies de Véronique, à sa naissance et à 17 ans (main gauche).
Atlas de la maturation squelettique du poignet et de la main (Sempé M., Pavia C.) [23]

d. L'évaluation radiologique de la maturation squelettique : Main-Poignet

Par évaluation de la maturation squelettique, nous entendons l'appréciation du degré de maturité du squelette, à l'aide de radiographies [139].

La radiographie, suivant l'âge de l'enfant, montre : d'abord, l'apparition de centres d'ossification primaires, pour les os courts, ou secondaires, pour les épiphyses ; puis, les modifications de leur forme et de leur dimension ; enfin, les soudures diaphyso-épiphysaires. Bien entendu, ces trois phases successives sont imbriquées dans le temps : une fusion épiphyso-diaphysaire peut se préparer alors qu'un centre tardif vient d'apparaître [139].

Un seul cliché radiographique permet d'étudier un maximum d'indicateurs avec un minimum d'irradiation, puisqu'il y a 33 os, osselets, sésamoïdes et épiphyses, isolables au niveau du poignet et de la main [23, 126], ce qui est plus qu'au niveau de toutes les autres articulations réunies [23].

L'ossification de la main est considérée comme un reflet représentatif de la maturation osseuse de la totalité du squelette, autrement dit, les conclusions de l'étude de plusieurs centres d'ossification 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 [126]. L'état de la main alors, est la référence habituelle : « la main se développe parallèlement au squelette » [69].

Les indicateurs osseux de la maturation :

Ces centres d'ossifications appelés « déterminateurs de maturité » (Todd, 1937), puis « indicateurs de maturité » (GP, 1950), sont « les caractéristiques des os (et non seulement des changements successifs de contour) qui peuvent être vus aux rayons X... et qui, à cause de leur ordre d'apparition... marquent leur avance vers la maturité » [139].

En postnatal, et radiologiquement, le poignet n'est pas ossifié sinon, très rarement, au niveau du capitatum et hamatum, la main est dépourvue de toute ossification initiale des épiphyses [135], et au fur et à mesure, le point d'ossification apparaît et augmente de volume. La date d'apparition des points d'ossification suit une chronologie assez fixe, permettant d'évaluer l'état de maturation osseuse. La morphologie des points d'ossification est souvent variable. Des aspects irréguliers ou des asymétries ne doivent pas être considérés comme forcément pathologiques [87].

Ainsi, l'analyse de la main et du poignet gauches, sur une radiographie de face, de bonne qualité et à taille réelle, consiste à apprécier le degré de maturation des points d'ossification des huit os du carpe, des cinq métacarpiens, des quatorze phalanges, du radius et de l'ulna. Cette analyse va permettre de comparer cette radiographie aux radiographies de l'atlas du même sexe, pour trouver celle dont l'aspect s'approche le plus, et d'affiner la corrélation entre l'AO ainsi déterminé et l'AC [126].

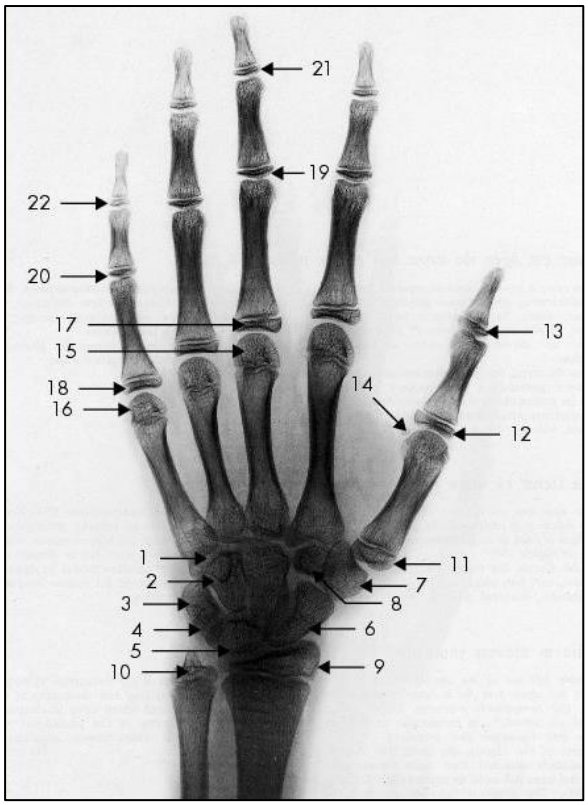


Figure 25 : Emplacement des indicateurs de maturation.
Atlas de la maturation squelettique du poignet et de la main (Sempé M., Pavia C.) [23]

Le schéma d'ossification :

La maturation d'un « centre d'ossification » se fait schématiquement en trois grandes étapes d'auxogénèse, de morphogenèse et de synostogénèse ou d'arthrogénèse (fig. 26) [23].

La première étape est l'auxogénèse, qui correspondant à la formation de la structure osseuse. Le phénomène d'ossification commence au centre de l'osselet. Il est repéré facilement sur le cliché radiographique, sous la forme d'un « point » dont les contours, d'abord flous (Q), vont se densifier pour devenir rapidement bien visibles (P). Ce « point d'ossification » évolue de façon centrifuge et va occuper ensuite progressivement tout le volume de la maquette cartilagineuse (N) à la fin de ce premier stade d'auxogénèse. Ainsi, pendant cette étape, l'évaluation de la maturation, consistera à apprécier les variations de volume du point d'ossification, ce qui permet une quantification facile (Q, P, N).

La deuxième étape dite de « morphogenèse », va donner ensuite à l'osselet une forme adaptée à sa fonction. Les éléments maturatifs sont alors appréciés sur des modifications de forme de l'osselet avec apparition de reliefs osseux et de lignes denses, bien visibles sur une radiographie de bonne qualité (M, L, K).

Vient ensuite la troisième étape de synostogénèse dans lequel les épiphyses vont se souder aux métaphyses ou d'arthrogénèse qui permet l'articulation des osselets entre eux comme au niveau du carpe, aboutissant à l'aspect adulte (R, Y, S, T).

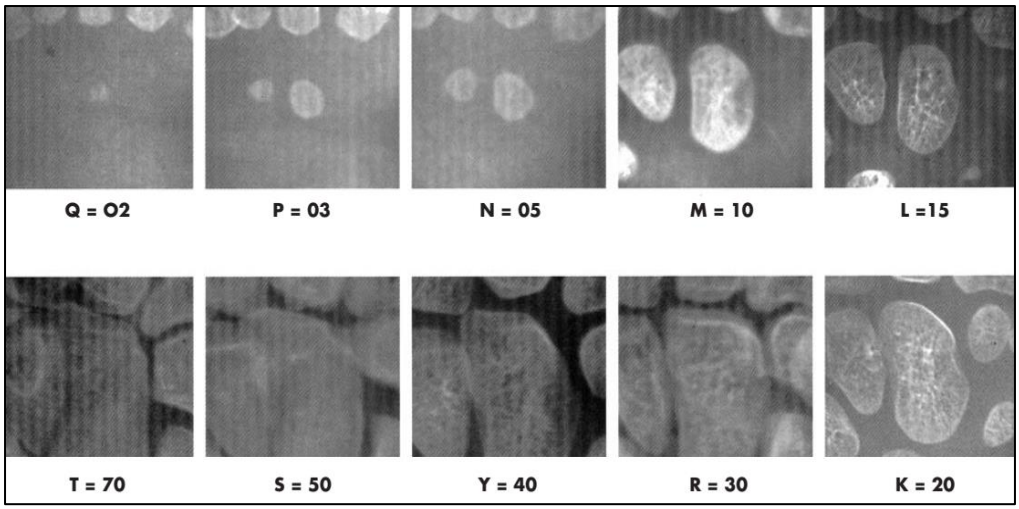


Figure 26 : L'os capitatum : les trois étapes d'auxogénèse (Q, P, N), de morphogénèse (M, L, K) et d'arthrogénèse (R, Y, S, T), d'après Sempé [23]

A la fin de cette évaluation, un pourcentage de maturation osseuse est donné, allant de 0 % à la naissance à 100 % à l'âge adulte. En effet, le phénomène maturatif, qui se fait selon un processus continu, va permettre de passer d'un modèle cartilagineux radiotransparent à la naissance, qui sera coté par définition à 0 % de maturation, à un aspect adulte radio-opaque achevé et fonctionnel, évalué à 100 % de maturation. Ce résultat de quantification peut ensuite être converti si nécessaire en équivalent « âge osseux », et être exprimée sous la forme de courbes de maturation squelettique (fig. 27), celles-ci pouvant être modélisées afin de développer des modèles mathématiques, pouvant être utilisés en recherche clinique [23].

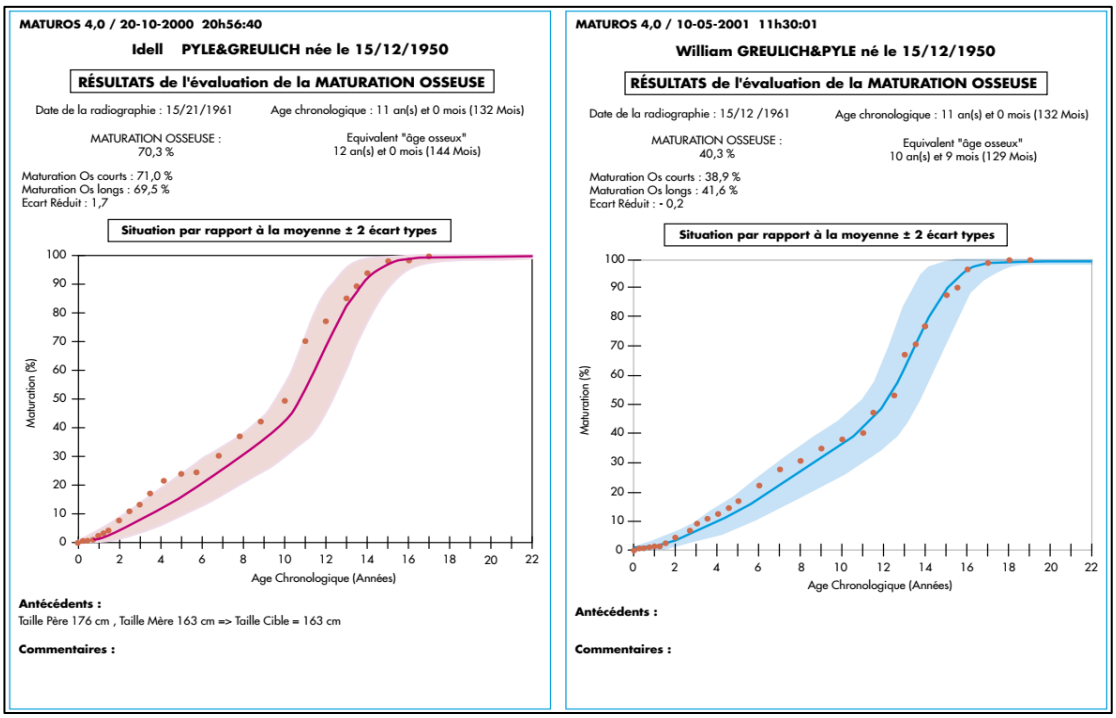


Figure 27 : Analyse des filles et des garçons selon Maturos : courbes de maturation squelettique [23]

Les principales méthodes d'évaluation « radiologiques » :

Comme pour l'examen morphologique, il importe de disposer de standards « radiologiques » donnant les âges habituels d'apparition et de soudures des points d'ossification. Ces tables de référence doivent distinguer les garçons et les filles puisque la vitesse de maturation osseuse étant plus rapide chez ces dernières, et indiquer en plus de la maturation moyenne, les limites des variations physiologiques [139]. Dans cette optique, plusieurs méthodes d'évaluation radiologique de la maturation squelettique ont été développées.

La radiographie à évaluer est alors comparée à des images radiologiques (ou à des schémas) de référence [23]. Il peut s'agir :

- des images d'un Atlas : où le résultat sera alors exprimé en équivalent « AO » [23]. La méthode de Greulich et Pyle (GP) avec son Atlas est un exemple [126] ;
- d'une méthode numérique : représentée par la méthode de Tanner et Whitehouse (TW), et la méthode de Sempé avec son logiciel MATUROS® [23].

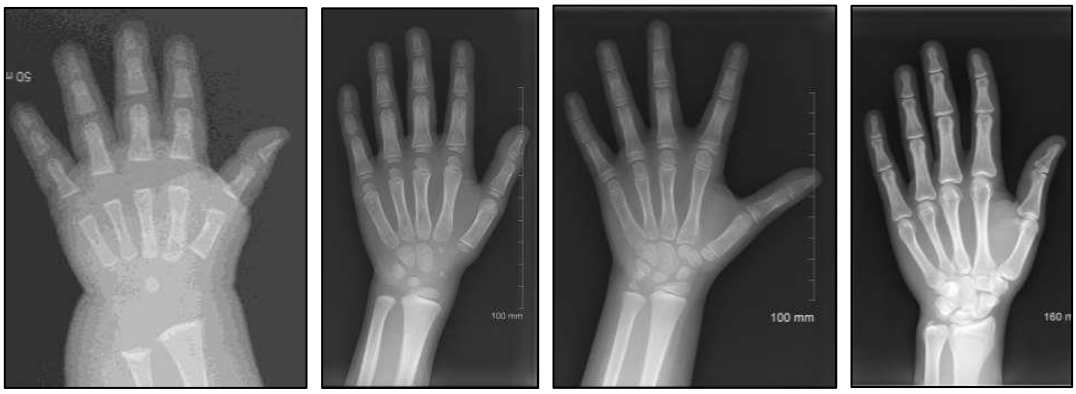


Figure 28 : Radiographie du poignet et de la main (face).
De la gauche à la droite : 6 mois, 3 ans, 9 ans, 18 ans [68]

Il suffirait donc d'avoir une série de reproductions des divers aspects successifs des régions choisies pour leur comparer le film à analyser et en conclure une probabilité d'appariement : le sujet serait réputé avoir l'« AO » le plus proche d'une certaine radiographie type portant un AC [135].

e. L'évaluation radiologique de la maturation squelettique : Autres sites

En plus de la radiographie du poignet et de la main gauche, qui reste incontournable à tous les âges, d'autres indicateurs pourront être utilisés, en fonction de besoins spécifiques [23]. En effet, à côté de la région main-poignet, l'évaluation radiologique de la maturation squelettique peut intéresser aussi d'autres « sites » ou régions anatomiques du squelette appendiculaire, telles : la clavicule, le coude, la crête iliaque, le genou, le pied et la cheville, etc… qui ont été choisies, car ce sont les plus étudiées et correspondent aux méthodes les plus fréquemment utilisées en pratique (Tab. 4) [126].

Tableau 4 : Les principales méthodes d'évaluation radiologique de l'AO [47]

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

L'extrémité médiale (ou sternale) de la clavicule :

La clavicule est le premier os du squelette à s'ossifier durant la vie fœtale, et l'extrémité médiale est la dernière épiphyse du squelette à fusionner, au cours de la troisième décennie de la vie (à 25 ans). C'est en raison de cette fusion tardive que l'extrémité médiale de la clavicule s'est avéré une zone intéressante dans la recherche d'indicateurs de maturation osseuse permettant de s'approcher de l'âge des 18 ans [126]. D'ailleurs, dans le cadre du processus de détermination de l'âge, 15 pays européens recourent à la radiographie de la clavicule [60].

Les méthodes basées sur l'étude de la clavicule impliquent l'évaluation de sa fusion : pour être considéré comme un adulte, les deux clavicules de l'individu doivent être fusionnées. Si la fusion est terminée et qu'une cicatrice est visible, on peut supposer, dans le cas des femmes, que la personne est âgée d'au moins 20 ans et, dans le cas des hommes, que la personne est âgée d'au moins 21 ans. La fusion totale avec disparition de la cicatrice a été observée pour les deux sexes à l'âge de 26 ans au plus tôt [60].

L'extrémité médiale de la clavicule a été étudiée sur des clichés radiographiques chez des populations d'origines différentes [47, 126], 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 incomplètes, puisque certains indicateurs n'ont pas été mesurés, par exemple l'âge de début de fusion métaphyso-épiphysaire [126].

En 2004, Schmeling et al. [47, 126] ont mené 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. Ils ont étudié 699 radiographies d'individus allemands âgés de 16 à 30 ans, et proposé une classification pour la fusion métaphyso-épiphysaire de

cette extrémité en 5 stades qui a été très largement reprise par la suite dans d'autres études similaires [126].

Plusieurs études (Tab. 5) ont testé la validité de cette classification (Garamendi, 2010 ; Cameriere, 2012). En effet, l'analyse de 274 radiographies de sujets italiens âgés de 12 à 25 ans par cinq observateurs 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 [126].

Tableau 5 : Les principales études portant sur la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule à partir de radiographies [126]

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[1]	22	26
Galstaun	1937	654	446	209	12-25	Inde (Bengale)	NR[1]	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[2]

[1]NR : non renseigné

[2]étude faite avec 5 observateurs

Néanmoins, des études récentes ont montré que les radiographies conventionnelles de la clavicule doivent être prises sur trois plans différents pour permettre une évaluation rigoureuse du stade de l'ossification. Il en résulte une augmentation de l'exposition aux rayonnements [60].

Le coude :

La radiographie du coude n'a d'intérêt le plus souvent qu'à partir de 8 ou 9 ans [23]. Mise à part la méthode et schémas de Sempé sur le coude (1976) [23], la méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein (1962) [23, 126], 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 [126].

Un score donné est attribué à chaque région étudiée : le capitulum (ancien : condyle) et l'épicondyle latéral (ancien : épicondyle), la trochlée, l'olécrâne et la tête radiale. 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'AO selon le sexe (Fig. 29) [126].

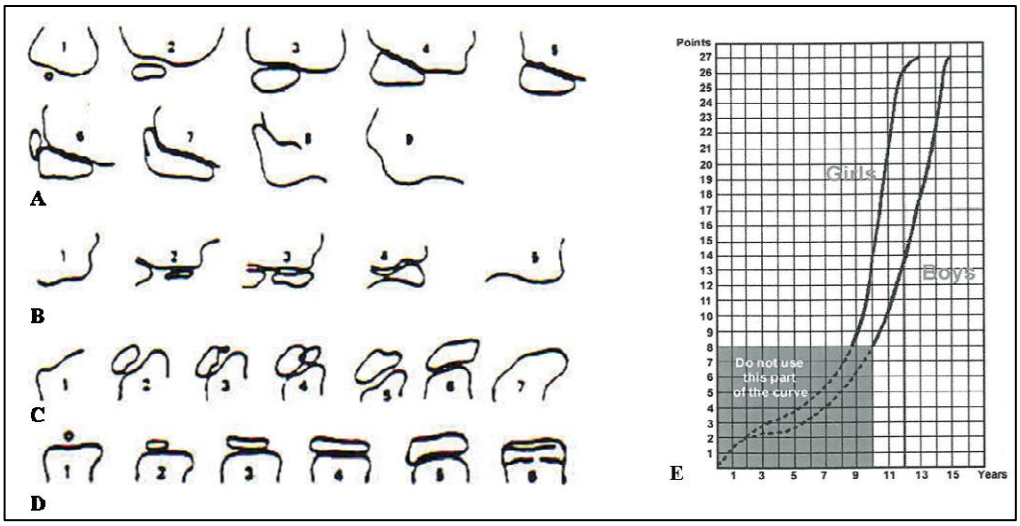


Figure 29 : Méthode de Sauvegrain, Nahum et Bronstein [126]
A : Condyle et épicondyle. B : Trochlée. C : Olécrâne. D : Tête radiale. E : Courbe de référence.

Chaumoître et al. (2006) ont testé la méthode de Sauvegrain en étudiant la différence entre l'AC et l'AO à partir de 106 radiographies d'individus âgés de 9 à 15 ans. Les résultats montraient une surestimation de l'AO de 6 mois en moyenne par rapport à l'AC, et un écart-type (ET) relativement important (+/- 11 mois) [126].
Cette méthode ne peut être utilisée que lors de la phase ascendante de croissance, 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 [126].



Figure 30 : Radiographie du coude (face).
De la gauche à la droite : 3 ans, 4 ans, 5 ans, 7 ans [68]



Figure 31 : Radiographie du coude (face et profil) : 11 ans [68]



Figure 32 : Radiographie du coude (face et profil).
de la gauche à la droite : 6 ans, 12 ans [68]

La crête iliaque :

L'ossification de la crête iliaque est évaluée par la méthode, ou le signe, de Risser, son dernier stade correspond à la fin de la croissance d'un individu, et son intérêt réside dans la concomitance entre la fin de cette ossification et celle de la croissance rachidienne [126].

Le signe de Risser 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. En effet, et il n'est pas possible, sur une radiographie, 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 [126].

En 1958, Joseph C. Risser, en examinant des enfants et des adolescents californiens de 1936 à 1946, 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. 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 (Fig. 33) [126].

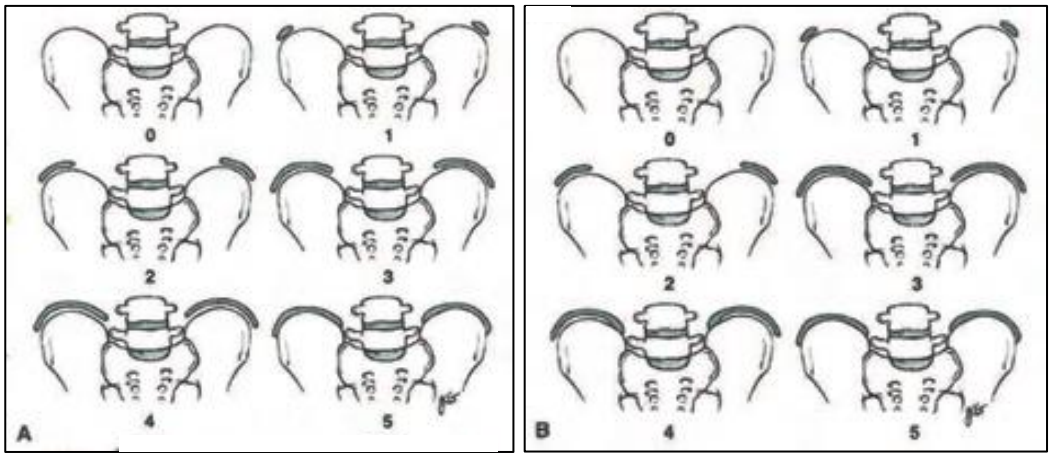


Figure 33 : Classification de l'ossification de la crête iliaque d'après Risser [126]
(A) Classification américaine. (B) Classification française.

Risser a constaté qu'en moyenne, cette ossification correspondait à un AC de 14 ans chez les filles, et de 16 ans chez les garçons, et que l'achèvement de cette ossification avait une excellente corrélation avec celui de la croissance des vertèbres [126].

Kotwicki (2009) 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 [126].

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 (pas de données fiables pour les individus ayant atteint l'âge de 18 ans), est l'irradiation gonadique liée à la radiographie du bassin [60, 126].

Dans le contexte de la détermination de l'âge à des fins juridiques, et en l'absence de bénéfice thérapeutique et étant donné l'âge des individus évalués, cette méthode ne doit pas être utilisée pour cette raison [126], bien que trois pays européens utilisent notamment cette radiographie de l'os iliaque [60].

Le genou :

Trois épiphyses peuvent être analysées de manière concomitante : l'épiphyse distale du fémur et les épiphyses proximales du tibia et de la fibula [126].

La fusion métaphyso-épiphysaire de l'épiphyse distale du fémur et de l'épiphyse proximale du tibia coïncide avec l'arrêt de la croissance en taille de l'individu car les épiphyses situées sur les deux versants de l'articulation du genou sont les dernières à croître au niveau des membres pelviens [47].

La maturation osseuse de ces épiphyses a été le sujet d'études anthropologiques sur os secs ou sur radiographies (Davies et Parsons, 1927 ; Paterson, 1929 ; Flecker, 1932 ; Stevenson, 1934 ; McKern, 1957 ; Hansman, 1962 ; Schaefer, 2005 ; O'Connor, 2008) [47, 126], mais l'étude radiographique la plus exhaustive de

l'articulation du genou est celle effectuée par Pyle et Hoerr (1955) [47]. Les radiographies d'individus féminins et masculins sont présentées sous la forme d'un atlas [23, 47, 126] basé sur les radiographies de genou droit dans des incidences de face et de profil, de garçons et de filles âgés d'un mois à 19 ans, originaires d'Amérique du Nord, les clichés ayant été recueillis entre 1927 et 1945 [47, 126].
Par rapport à l'atlas de GP, l'atlas de Pyle et Hoerr 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), bien qu'il puisse être utilisé sur une population moderne de niveau socio-économique similaire (Hackman, 2013) [126].
L'atlas créé par Pyle et Hoerr permet de déterminer l'âge d'individus féminins de un mois à 16 ans et masculins de un mois à 19 ans en fonction de l'aspect radiologique du genou droit de l'individu étudié [47].
Plus récemment, Cameriere et al. (2012) ont appliqué une classification sur la fusion métaphyso-épiphysaire, en trois stades 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 [126].
Malgré ces résultats, le genou n'est actuellement pas utilisé en pratique dans la détermination de l'âge à des fins juridiques [126].



Figure 34 : Radiographie du genou (profil).
De la gauche à la droite : 11 mois, 4 ans, 5 ans [68]

<u>La région cheville-pied :</u>

La fusion de l'épiphyse distale du tibia a été étudiée par certains auteurs (Davies, 1927 ; Flecker, 1932 ; Banerjee, 1998 ; Crowder, 2005 ; Bokariya, 2010 ; Patond, 2012). Ces auteurs ont analysé des radiographies d'individus vivants (Tab. 6) et ont observé que la fusion débutait entre 11 et 13 ans pour les femmes et entre 12 et 15

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 [126].

Cependant, il y a peu de données sur l'ossification et la fusion de l'épiphyse du calcanéus. 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) [126].

Flecker (1932) 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. Ferembach (1979) a décrit l'âge de fusion de l'épiphyse calcanéenne entre 16 et 19 ans quel que soit le sexe. Scheuer et al. (2005) 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 [126].

Tableau 6 : Les principales études publiées sur les âges de début de fusion et de fusion complète de l'épiphyse distale du tibia [126]

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

Hoerr et Pyle (1962) ont constitué un atlas radiographique du développement du pied et de la cheville [23, 126] à partir de l'analyse 4500 radiographies de jeunes Américains, avec la même méthodologie et la même population que les atlas de GP (main-poignet, 1959) et de Pyle et Hoerr (genou, 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. La fusion complète du calcanéus 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. (2013) ont testé 403 radiographies d'individus écossais contemporains en utilisant cet atlas. Les résultats montraient une forte corrélation entre l'AO et l'AC [126].

Une étude de Whitaker (2002) 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 (AR) plus précise qu'en analysant un seul os. 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'AO. Davies et al. (2013) 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. Il s'agissait donc d'une méthode imparfaite, peu reproductible [126].



Figure 35 : Radiographie de la cheville et du pied [68]

<u>Autres régions anatomiques :</u>

Des travaux ont porté sur l'analyse radiographique des autres régions anatomiques, et où les résultats étaient encourageants mais la reproductibilité de ces méthodes n'a pas été évaluée et ces techniques ne sont pas utilisées [126]. A savoir :

- L'épiphyse proximale de l'humérus (Zydek, 2011) [126], ou radiographie de l'épaule droite [60] ;
- L'épiphyse proximale du 5ème métatarsien (Davies, 2013) [126] ;
- La hanche et le bassin (schémas d'Acheson, 1957) [23].



Figure 36 : Radiographie du bassin et de la hanche (face).
De la gauche à la droite : nouveau-né, 4 mois, 8 mois [68]

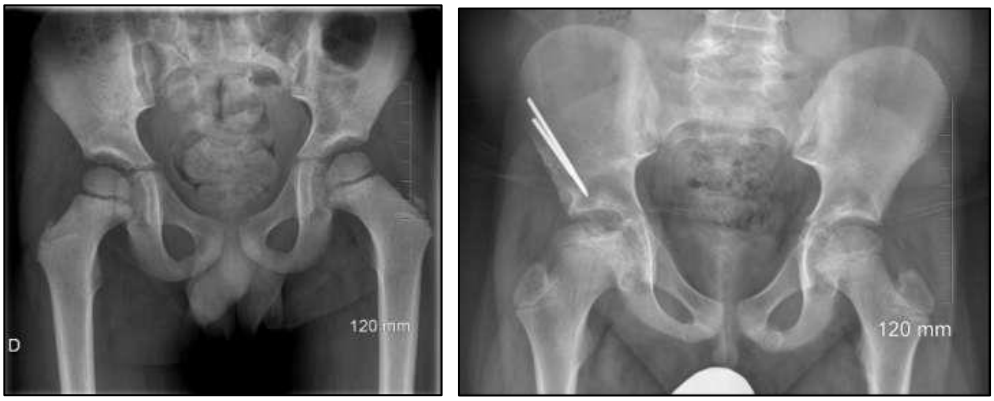


Figure 37 : Radiographie du bassin et de la hanche (face).
De la gauche à la droite : 4 ans, 10 ans [68]

2. L'ECHOGRAPHIE

L'échographie est une technique d'imagerie non irradiante [140], et les progrès de ces moyens actuels de l'imagerie ont permis une certaine estimation de l'« âge post-conceptionnel » sinon de l'embryon, tout au moins du fœtus [135] : l'échographie, reste l'examen idéal pour le stade prénatal et aussi le postnatal avant que les épiphyses s'ossifient [87].

Les ultrasons sont des ondes sonores imperceptibles à l'oreille humaine. Comme toutes les ondes sonores, les ultrasons sont absorbés ou réfléchis par les substances qu'ils rencontrent. Les liquides par exemple les absorbent tous. Ils peuvent être émis par une sonde en direction d'un objet solide à atteindre. Le temps qu'ils mettent à revenir à la sonde qui les a émis (écho) est fonction de la distance à laquelle se trouve l'objet [50].

Dans l'échographie, la mesure de l'écho est analysée par un ordinateur et restituée en temps réel sur l'écran sous forme de points plus ou moins noirs délimitant les différentes structures. En pratique, la sonde est dirigée et "promenée" sur la région à examiner après avoir appliqué un gel ou une pâte afin de permettre la transmission des ultrasons (faute de quoi ils seraient arrêtés par l'air) [50].

a. L'échographie en période prénatale :

La détermination de l'âge fœtal peut se faire à travers différents indicateurs. En intra-utérin c'est surtout l'étude échographique qui est appliquée : la méthode échographique est la méthode de référence in utéro [78].

Chez le fœtus, les méthodes utilisées pour l'estimation de l'âge fœtal sont variables basées initialement sur des méthodes anthropométriques [78]. Ainsi, la croissance

intra-utérine peut être appréciée en échographie grâce à l'étude du diamètre biparietal (BIP) et de la taille du fémur [27]. Les longueurs des différents segments de membre sont bien connues à chaque stade de la grossesse, notamment dans les derniers mois [87].

Cependant, les mesures échographiques sont dépendantes de l'observateur et de la position du fœtus. De plus, peu d'études ont recherché des corrélations écho-anatomiques. Cronk et Sherwood ont démontré la présence de multiples éléments d'erreur dans les études échographiques, tels que l'absence de méthode standard, la faible répétabilité de certaines mesures mais aussi des erreurs dans la technique utilisée (plan de mesure) [78].

Les mesures anthropométriques échographiques (non directes) : Quelques repères

Les études échographiques sont nombreuses et définissent avec précision et sur de très larges séries, les standards de croissance normale de divers paramètres biométriques. Ces études ont un double intérêt : permettre une détermination précise de l'âge fœtal et permettre une identification des RCIU [1].

En raison de leur double intérêt, ces études sont présentées sous formes de standards dont les valeurs sont détaillées sous forme de moyennes et ET ou de courbes de percentiles [1].

Classiquement, les études échographiques distinguent les paramètres pertinents durant le premier trimestre de la gestation de ceux qui sont pertinents pour les deuxième et troisième trimestres [1] :

- Au cours du premier trimestre :
  - L'estimation de l'âge se fait à partir de la mesure de la distance Vertex-Coccyx, la circonférence du tronc et le BIP [1].
  - Intérêt de chercher les membres : 3 segments à chaque membre thoracique, et 3 segments à chaque membre pelvien ; en fait, tous les os longs peuvent être visualisés, il peut être utile d'étudier les extrémités [74].
- Au cours du second trimestre :
  - Le BIP est toujours utilisé pour l'estimation de l'âge [1, 27, 74], puis s'ajoutent le périmètre crânien (PC) [74], le diamètre abdominal transverse, les mesures cérébrales (notamment celle des ventricules), les distances orbitaires, la mesure de la clavicule, des os longs des membres et celle du pied [1].
  - Parmi les mesures des diaphyses osseuses, la mesure de la longueur fémorale (LF) est très fréquemment décrite comme présentant les meilleurs résultats, à la fois en précision de l'estimation de l'âge et en fiabilité de la mesure [1, 27, 74]. Cependant, cette mesure présente trop de variabilité inter-observateur, le grand axe de la diaphyse doit être

perpendiculaire au faisceau d'insonation (exposition aux US), et en mesurant le fémur le plus proche de la sonde [74].

- La mesure du pied se fait du gros orteil au talon sur une coupe plantaire [74].
- L'examen des membres, vérifie deux choses : la présence de 3 segments par membre (en suivant chaque membre de sa racine à l'extrémité distale), et la présence des 2 os du segment médian de chaque membre en coupe transversale et longitudinale [74].
- L'examen du segment distal des membres s'intéresse à : compter les doigts si possible, vérifier l'opposition du pouce, et éliminer les anomalies positionnelles du pied ou de la main et les anomalies de nombres des doigts [74].

- Au cours du troisième trimestre :

  L'étude des points d'ossification épiphysaires en échographie permet l'évaluation de la maturation osseuse chez le fœtus [110]. L'apparition de ces points d'ossification est prise en compte pour affiner les prédictions d'âge [1]. Les trois principaux points d'ossification épiphysaires fœtaux des os longs, recherchés échographiquement durant le 3ème trimestre de la grossesse sont [110] :

  - Point d'ossification fémoral inférieur (Béclard) : son apparition s'observe à 32-36 SA [74, 110] ;
  - Point d'ossification tibial supérieur (Todd) : son apparition s'observe à 34-36 SA [74, 110] ;
  - Point d'ossification, huméral supérieur : son apparition s'observe à 33-36 SA [110].

L'examen morphologique pathologique : Quelques anomalies des membres

À la naissance, et en fonction du terme, des tables permettent d'apprécier la normalité de la taille, du poids et du périmètre crânien, et éventuellement d'identifier les enfants présentant un RCIU [27].

La morphologie inhabituelle peuvent être observées en échographie et permettre de poser un diagnostic précoce [87]. Parmi ces anomalies, on cite [74] :

- Agénésie transversale : atteinte du membre thoracique le plus souvent isolée, atteinte du membre pelvien souvent associée à d'autres amputations ;
- Agénésie longitudinale : absence de la fibula ou de tibia, absence d'humérus ou de l'ulna ;
- Apodie et achéirie : absence de pied ou de main ;
- Ectrodactylie : agénésie du rayon médian ;
- Anomalies de segmentation : Polydactylie et Syndactylie ;
- Anomalies de position : Pieds bots, Mains botes, Clinodactylie, Camptodactylie ;
- Ostéochondrodysplasies :

- Dysplasies létales : nanisme thanatophore, achondrogénèse, syndrome polydactylie-côtes courtes, ostéogénèse imparfaite de forme grave ;
- Dysplasies non létales : achondroplasie, ostéogénèse imparfaite ;

- Arthrogrypose avec absence de mouvement des membres, raideur articulaire avec attitude en extension des membres, des mains et des pieds bots.

b. L'échographie en période postnatale :

Dans un but d'utilisation des ultrasons pour déterminer l'âge, l'échographie a été utilisée sur la région main-poignet, l'extrémité médiale de la clavicule, la crête iliaque [60, 126, 140] et sur la tête fémorale [67] :

- **<u>La région main-poignet :</u>**

  Cette région a été étudiée par échographie à plusieurs reprises :

  - L'étude de Bilgili et al. (2003) montrait une bonne corrélation entre les résultats obtenus à l'échographie du poignet et ceux obtenus à partir de l'atlas de GP dans les premières années de vie, mais l'échantillon ne concernait que des enfants âgés de moins de 6 ans [126].
  - Mentzel et al. (2005) ont réalisé des recherches sur l'utilisation des ultrasons pour déterminer l'âge pour le groupe des 6-17 ans, faisant état d'un lien avec l'approche manuelle de GP [60], avec une bonne corrélation entre les résultats de l'échographie et l'AR de l'individu comparé à cette méthode [126].
  - L'étude de Xu et al. (2008) fait toutefois état d'un lien plus faible, en particulier pour les groupes plus âgés [60].
  - Pour Khan et coll. (2009), l'évaluation de la maturation épiphysaire du poignet au moyen d'une technique échographique a montré être moins fiable et non reproductible par comparaison à l'estimation de l'AO sur radiographie du poignet et analyse soit selon GP soit selon TW [67]. Ils arrivent alors, à une conclusion indiquant que l'examen échographique ne devrait pas être considéré comme une méthode valide de substitution pour déterminer l'AO [60], en raison d'une grande variabilité des résultats obtenus avec l'échographie, par rapport aux méthodes GP et TW [126]. Ces conclusions sont les mêmes que celles de l'étude de Castriota-Scanderbeg et al. (1998) [126]. De plus, cette technique de Khan tend à surestimer l'âge de sujets atteints de retard de croissance et à sous-estimer l'AO de patients subissant une avance dans leur croissance [67].
  - Schmidt et al. (2013) ont conduit une étude dont l'objectif était spécifiquement de déterminer si l'analyse de l'épiphyse distale du radius par échographie pouvait remplacer la méthode de GP 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 [126].

- **<u>L'extrémité médiale de la clavicule :</u>**

  Les ultrasons ont été également utilisés pour déterminer l'âge à partir de la clavicule, mais dans ce cas, la classification traditionnelle a dû être modifiée. Quatre stades ont été définis, où la première occurrence du stade 4 de développement a été observée à 19 ans chez les femmes [60]. Cet apport de l'échographie de l'extrémité médiale de la clavicule a fait l'objet de deux études :

  - Schulz et al. (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. 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 [126]. Cependant, les tranches d'âge observées pour les stades correspondent avec les données connues des bilans radiologiques et tomodensitométriques sont peu, et les résultats devraient être confirmés dans un plus grand nombre de cas et avec une analyse de la variabilité en fonction des observateurs [60].
  - Quirmbach (2009), utilisait la même méthodologie, en l'appliquant sur 77 hommes âgés de 18 à 24 ans. 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 [126].

  Au total, 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 [126].

- **<u>La crête iliaque :</u>**

  Trois études ont été analysées portant sur la fusion de la crête iliaque par échographie, et testent l'applicabilité des examens échographiques pour déterminer la fusion de la crête iliaque [60, 126] :

  - Les résultats des études Wagner (1995) et Thaler (2008) montraient qu'il existait une bonne corrélation entre échographie et radiographie pour le même individu. Cependant, des difficultés étaient rencontrées pour distinguer les stades 3 et 4 de Risser, surtout chez les adolescents obèses [126].
  - Dans l'étude pilote de Schmidt et al. (2011) [60, 126], Les résultats de l'étude ont été obtenus par un examinateur certifié dans le domaine de l'échographie squelettique qui ne connaissait pas l'AC des sujets.

L'étude conclut que l'approche peut être une méthode valide et efficace, mais qu'il faut effectuer des études à plus grande échelle [60], et confirme que cette méthode pouvait avoir un intérêt par rapport aux seuils de 14 et 16 ans [126].

- **<u>La tête fémorale</u>** [67] **<u>:</u>**

  La maturation de la tête fémorale a été testée échographiquement par Castriota-Scanderbeg et De Micheli qui postulent dans leur étude que l'épaisseur du cartilage de la tête fémorale, mesuré antérieurement par ultrasonographie (US) (fig. 38 et 39), est un indicateur valable tant de l'AO que de l'AC [67].

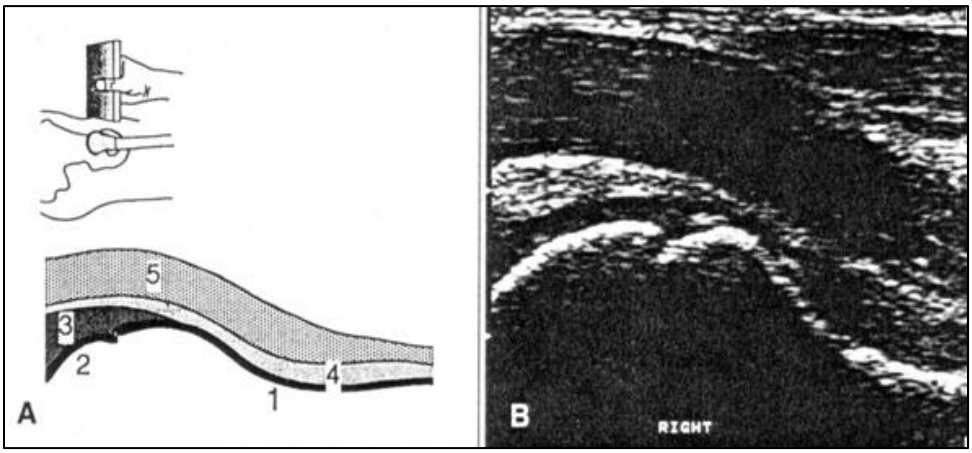


Figure 38 : Technique d'évaluation de l'épaisseur du cartilage de la tête fémorale en US, selon l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli [67]

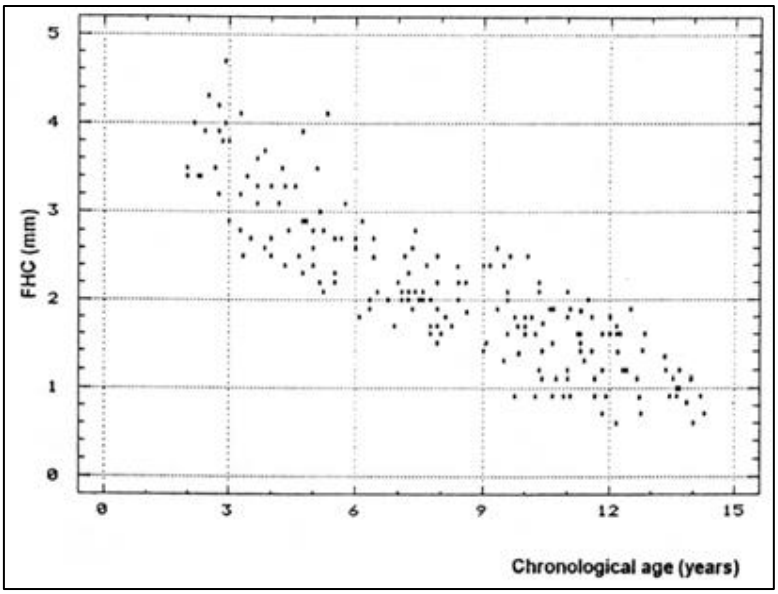


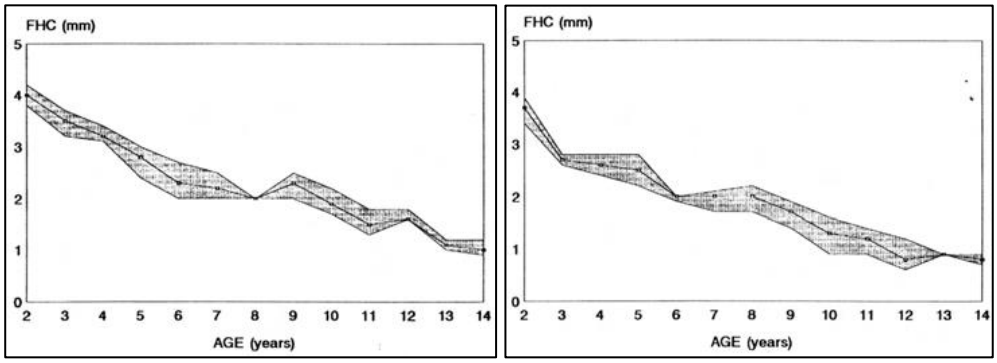
Figure 39 : Corrélation négative entre les mesures de l'épaisseur du cartilage de la tête fémorale de et l'AC, selon l'étude Castriota-Scanderbeg et De Micheli [67]

Bien que ces résultats semblent prometteurs, l'échantillon de l'étude est petit et homogène. En conséquence, les auteurs considèrent que leurs conclusions peuvent ne pas être applicables à d'autres ethnies [67].

Tableau 7 : Résultats de l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli [67]

Femoral head cartilage thickness	Right	Left	Side difference[a]
Range	0.6–4.7	0.5–4.7	0–0.3
Mean	2.13	2.14	0.05
SD	0.92	0.92	0.07
95th percentile	–	–	0.20

[a] Difference between left and right side measurements



Figures 40 et 41 : Résultats de l'étude de Castriota-Scanderbeg et De Micheli, chez les deux sexes [67]

Par ailleurs, une autre étude a montré que la précision de cette méthode peut être considérée comme cliniquement suffisante aussi bien pour la variabilité intra- que inter-observateurs (variation maximum de 7,5 mois) [67].

Enfin, l'étude Castriota-Scanderbeg et coll., en comparant la technique US de la tête fémorale avec les résultats obtenus au moyen des méthodes classiques (GP, TW-RUS, TW-B20) ont pu déceler un manque de précision de la méthode US. De leurs résultats ils concluent que la méthode US est non utilisable cliniquement [67].

c. Quelques avantages de l'échographie :

L'échographie, comme technique d'imagerie présente des avantages, notamment [67, 126, 140] :

- L'innocuité : pas de rayonnements ionisants (que des ultrasons) ; en plus, l'examen est non invasif et indolore ;
- La rapidité de l'examen ;
- La facilité d'accès à cette technique d'imagerie et à son matériel dans tous les centres hospitaliers ;
- Les variabilités inter- et intra-observateurs sont bonnes (Castriota-Scanderbeg, 1996).

d. Quelques inconvénients de l'échographie :

Cependant, l'échographie a plusieurs inconvénients rendant son utilisation difficile en pratique courante, tels [67, 126, 140] :

- La longueur du temps d'apprentissage ;
- La longueur du temps d'examen, qui est considéré comme rédhibitoire : 5 minutes d'immobilisation et d'immobilité totale du poignet ;
- L'importance de l'expérience de l'opérateur dans la pratique de cette technique d'imagerie ;
- La dépendance des « images à visualiser », l'épiphyse par exemple, des positions de la sonde et du patient, de la corpulence du patient et de la zone anatomique étudiée ;
- 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.

3. LA TOMODENSITOMETRIE (TDM) :

La tomodensitométrie (TDM) appelée également Scanner ou CT-scan, est une technique radiologique récente, qui a été mise au point par Hounsfield en 1973 [47].

Cet outil radiologique permet d'acquérir une série d'incidences radiologiques différentes, lesquelles sont traitées par ordinateur pour fournir une coupe d'épaisseur donnée [149].

En effet, le scanner permet une modulation si fine de l'irradiation aux rayons X que la zone étudiée peut être comme « découpée en tranches » (« tomographie »). Couplée à un traitement numérique des données, la mesure du coefficient d'atténuation des rayons X permet alors de restituer une image précise de la zone étudiée [50].

Les progrès de l'informatique, de la radiologie, et en particulier de la TDM, permettent aujourd'hui d'obtenir en peu de temps des images des pièces osseuses très représentatives de la structure étudiée [149].

Bien que cet examen ait perdu beaucoup de sa valeur depuis l'avènement de l'IRM [87], les scanners ne cessent pas d'évolution. Les TDM multicoupes hélicoïdales modernes permettent d'obtenir des images en moins d'une seconde, et visualiser le corps entier depuis le sommet du crâne jusqu'aux cuisses peut ne nécessiter que le temps de retenir sa respiration pendant quelques secondes. Cette rapidité permet l'examen en imagerie dynamique des artères et des veines à différents moments après l'injection intraveineuse de produits de contraste. Le mode d'acquisition continue de données par un scanner hélicoïdal permet la reconstruction d'une image dans n'importe quel plan, le plus couramment sagittal et coronal. L'imagerie orthogonale améliore grandement la compréhension des aspects tridimensionnels de l'anatomie radiologique ; elle fait maintenant partie intégrante de la pratique d'évaluation des maladies. Avec les scanners

modernes, le plan de coupe peut être incliné jusqu'à 25 degrés, ce qui est particulièrement utile pour l'imagerie du rachis [149].

Aucune préparation spécifique n'est nécessaire pour l'examen TDM du système musculo-squelettique [149]. La TDM peut apprécier le synchronisme et la vitesse de maturation osseuse spécifique pour chaque os [32], comme elle peut mesurer ce qui est vraiment ossifié d'un cartilage de croissance, pour pouvoir mesurer l'âge déjà révolu [53].

La littérature insiste sur un examen scannographique important pour l'évaluation de la maturation squelettique, représenté par l'étude de l'extrémité sternale claviculaire.

a. L'étude de l'extrémité sternale claviculaire :

Parmi les recommandations établies par un groupe d'experts réunis sous l'acronyme AGFAD (the Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin) en 2000 et réactualisées en 2008 : « Si les indicateurs du poignet sont fusionnés, une radiographie ou un scanner des clavicules devrait être effectué » [83]. En effet, l'extrémité sternale de la clavicule est intéressante dans ce contexte car elle est la dernière épiphyse du corps humain à fusionner, quand les autres indicateurs osseux (dont ceux du poignet et de la main) sont déjà arrivés à maturation [83].

La clavicule commence à s'ossifier durant la vie fœtale et l'extrémité sternale finit son ossification dans la troisième décennie de vie [83].

Plusieurs études ont été effectuées pour estimer le stade d'ossification de l'épiphyse sternale claviculaire [67] et évaluer l'intérêt de l'analyse de la clavicule au scanner dans un contexte médico-légal [83] :

- Kreitner et coll. (1998) ont étudié la maturation osseuse des extrémités médiales claviculaires sur des images TDM [67, 72, 83, 126] de 380 sujets d'âges connus (1 à 29 ans : 151 Féminins et 229 Masculins) selon les 4 premiers stades de maturation de l'extrémité médiale de la clavicule [67, 72]. Pour eux : il est possible de préciser, apparemment indépendamment du sexe, de l'ethnie et de facteurs exogènes (alimentation, facteur séculaire, état socio-économique) qu'une clavicule au stade 4 correspond à un âge très probablement supérieur à 22 ans (la probabilité d'avoir 20 ans au stade 4 est inférieure à 0,1% avec un intervalle de confiance (IC) de 95%) [67]. Cependant, les auteurs n'ont pas effectué de distinction entre hommes et femmes au sein de leur échantillon, ce qui limitait l'intérêt de leur étude [83, 126].
- Schmeling et al. (2004) ont mis au point une classification en cinq stades de l'ossification de la clavicule visible sur des radiographies. Cette classification a ensuite été adaptée à la lecture de scanners de clavicule, et ce pour une estimation plus précise de l'âge [72, 83, 126]. Bien que dans certaines enquêtes, la radiographie conventionnelle de l'épiphyse claviculaire médiale ait été appliquée, plusieurs études ont souligné que les données fournies par l'imagerie CT sont supérieures [72].

Classification de Schmeling adaptée au scanner : [126]

- Stade 1 : le centre d'ossification n'est pas visible ;
- Stade 2 : le centre d'ossification est visible, l'épiphyse n'est pas ossifiée ;
- Stade 3 : fusion partielle de l'épiphyse ;
- Stade 4 : fusion complète de l'épiphyse, une cicatrice épiphysaire est visible ;
- Stade 5 : fusion complète de l'épiphyse, absence de cicatrice épiphysaire.

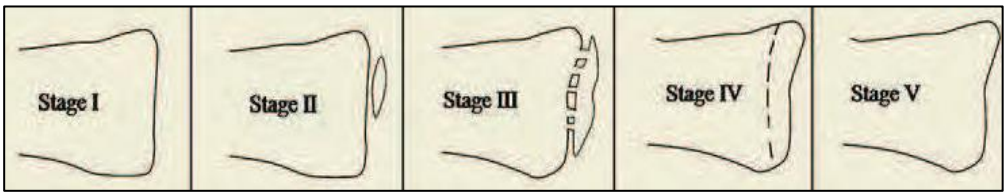


Figure 42 : Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule, mise au point par Schmeling (schémas) [126]

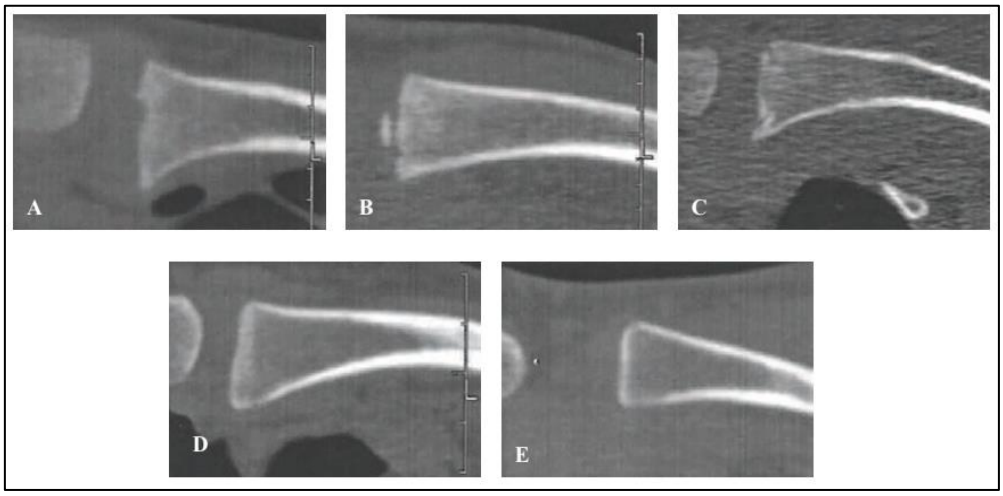


Figure 43 : Classification de Schmeling adaptée au scanner [126]

- R. Schulz et coll. (2005), ont étudié 556 scanners de clavicule de sujets allemands âgés entre 15 et 30 ans en utilisant les 5 stades établis par Schmeling et coll. ils ont pu montrer un excellent accord entre la technique radiographique standard et la TDM : 97 cas classés de la même manière sur 99 et pour les 2 cas discordants, la TDM donnait un stade 2 alors que la radiographie suggérait un stade 3. Par contre la TDM est considérée par ces auteurs comme plus performante car elle a permis l'évaluation de tous les cas de l'échantillon alors que les radiographies n'étaient pas interprétables pour 14 cas (soit 13%) [67]. Par ailleurs, les auteurs trouvaient un âge de fusion complète sensiblement différent de celui établi jusque-là par l'étude 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), 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 [126].

Donc, une épaisseur de coupe de 1 mm au maximum a été recommandée pour que l'analyse de la fusion au scanner soit fiable [83]. Mühler et coll. (2006) ont démontré la nécessité d'utiliser la meilleure résolution (acquisition à 1mm et reconstruction de 1mm) sous peine de surévaluer le stade d'un sujet à son détriment (Fig. 44) [67]. : « Avec une épaisseur de coupe importante, les stades d'ossification apparaissent à des âges plus précoces » [126].

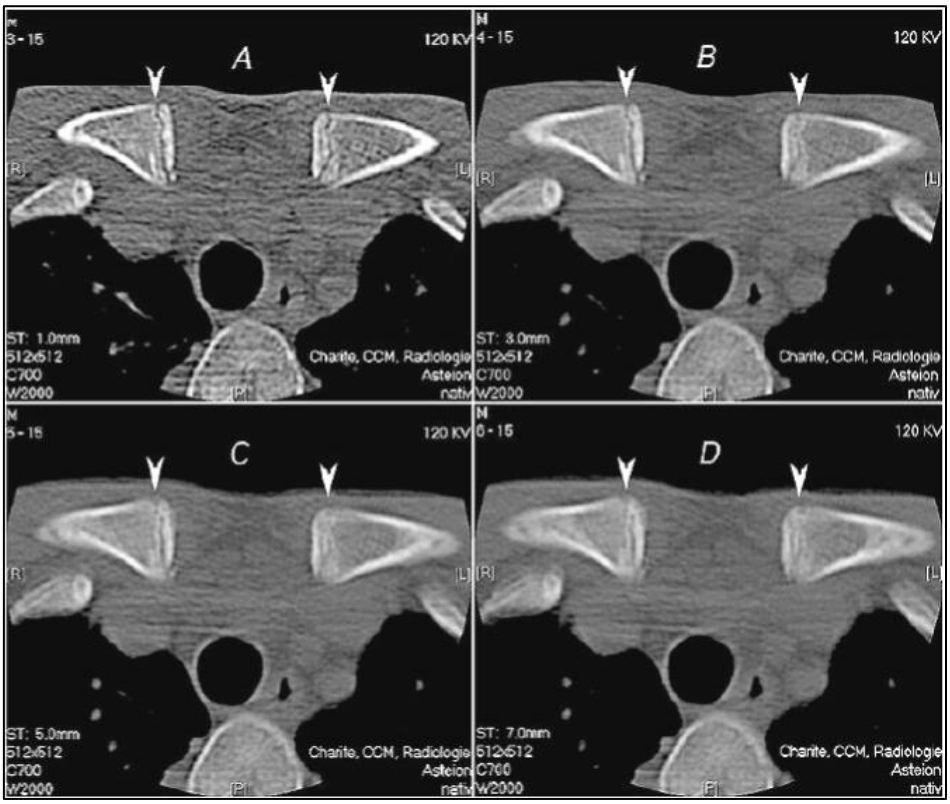


Figure 44 : L'effet de l'épaisseur de coupe sur l'évaluation du stade d'après Mühler et coll. [67]

L'intérêt de la méthode est d'affirmer un âge adulte (21 ans) chez le sujet vivant lorsque le dernier stade de maturation est atteint. Sur examen TDM, la fusion épiphysaire sternale claviculaire complète avec visibilité de la ligne de fusion signe un AO de 20 ans pour la fille et 21 ans pour le garçon et la disparition de la ligne de fusion a lieu dès 26 ans pour les 2 sexes [67].

- Kellinghaus et al. (2010) avaient un échantillon 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 [126].

Tableau 8 : Les 9 stades développés par Kellinghaus et al. [83]

Stades	Sous-stades	Signification
Stade 1	Absence de fusion. Le centre d'ossification n'est pas encore visible.	
Stade 2	Apparition du cartilage de conjugaison. Le centre d'ossification est ossifié et s'étend progressivement entre les stades 2a et 2c. Il n'y a pas de fusion entre l'épiphyse et la métaphyse qui restent distinctes.	
	s/stade 2a	Correspond à un point d'ossification dont la longueur est inférieure ou égale au tiers de la longueur de la métaphyse.
	s/stade 2b	Correspond à une longueur du point d'ossification de plus d'un tiers et jusqu'à deux tiers de la longueur de la métaphyse.
	s/stade 2c	Correspond à une longueur du point d'ossification supérieure aux deux tiers de la longueur de la métaphyse.
Stade 3	Fusion partielle, incomplète de l'épiphyse cartilagineuse. La fusion entre la métaphyse et l'épiphyse est en cours. L'espace entre l'épiphyse et la métaphyse est discontinu.	
	s/stade 3a	Correspond à une fusion d'un tiers ou moins de la longueur totale de la métaphyse.
	s/stade 3b	Correspond à une fusion étendue à plus d'un tiers et jusqu'à deux tiers de la longueur de la métaphyse.
	s/stade 3c	Correspond à une fusion entre la métaphyse et l'épiphyse supérieure aux deux tiers de la métaphyse.
Stade 4	Fusion complète. Epiphyse et métaphyse sont complètement fusionnées. Il existe une fine ligne horizontale, parallèle à l'extrémité médiane de l'épiphyse, correspondant à une cicatrice épiphysaire.	
Stade 5	Fusion complète, disparition de la cicatrice. Il s'agit du dernier stade de maturation, défini par la disparition de la cicatrice épiphysaire.	

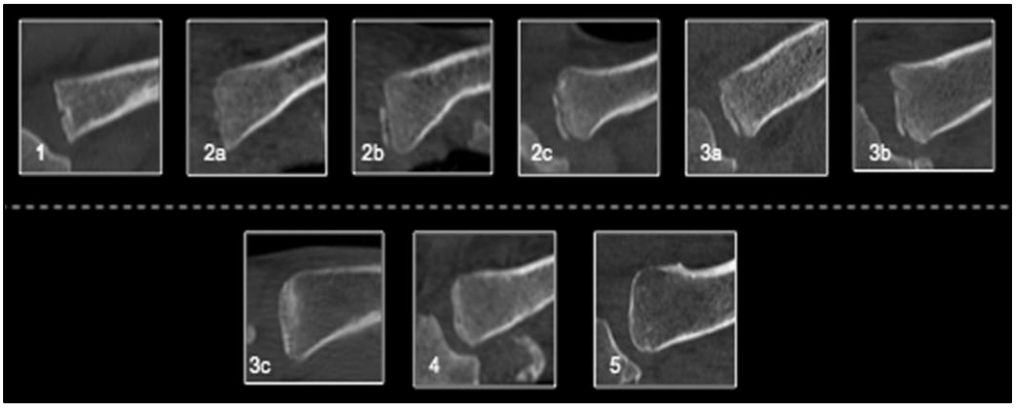


Figure 45 : Illustration des stades de la classification en 9 stades développée par Kellinghaus et al., sur la base de celle de Schmeling et al. [83]

En raison du développement technique des scanners CT, y compris l'acquisition en coupes fines, la classification en cinq étapes a été modifiée par Kellinghaus et al avec l'introduction de sous-groupes plus détaillés 2a-c et 3a-c [72]. En effet, ces mêmes auteurs affirmaient avoir trouvé un stade permettant de faire la distinction entre mineurs et majeurs. Ils ont affiné la classification à 5 stades de Schmeling pour aboutir à 9 stades : les stades 2 et 3 étant subdivisés en trois sous-catégories de a à c (phases précoce, intermédiaire, tardive). Ils ont ensuite analysé une seconde fois les 185 scanners classés en stades 2 et 3 de leur étude précédente [83, 126]. Cette étude est importante car, pour la première fois, un des stades, le stade 3c (correspondant à une fusion d'au moins deux tiers de la longueur de l'épiphyse), semblait être contributif pour le seuil des 18 ans [83, 126, 140]. Tous les individus dont la clavicule était évaluée au stade 3c étaient âgés d'au moins 18 ans dans l'échantillon choisi. La limite inférieure du stade 4 (correspondant à la fusion complète) était de 21 ans. Ce résultat était particulièrement intéressant dans ce contexte [83] : les auteurs concluaient qu'il était possible de dire qu'un individu avait plus de 18 ans si un stade 3c était observé [126], étant donné que l'âge de 18 ans est l'âge de la majorité pénale dans la plupart des pays [83]. 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 [126].

- Une étude récente de Pattamapaspong et al. (2015), portant sur un échantillon d'individus thaïlandais, était plutôt en faveur du stade 4 (fusion complète) comme le seuil des 18 ans [83].
- Dans une étude plus récente (Gassenmaier et al., 2020), faite sur 144 individus pour l'estimation médico-légale de l'âge chez les adolescents vivants à l'aide de l'imagerie CT à faible dose (LD = low dose) de l'épiphyse claviculaire médiale, à la recherche de la faisabilité de cette imagerie CT à faible dose pour la détermination médico-légale de l'âge des adolescents vivants et son impact sur la qualité de l'image. La dose de rayonnement a été réduite par respect du principe ALARA (Tab. 9).

Tableau 9 : Comparaison de la dose de rayonnement entre l'imagerie à faible dose et à dose standard [72]

	Low-dose imaging	Standard-dose imaging	*p* value
DLP (mGy*cm)	8.3 (IQR: 7.0)	226.8 (IQR: 68.5)	< 0.001
$CTDI_{vol}$ (mGy)	0.3 (IQR: 0.2)	6.7 (IQR: 1.8)	< 0.001
Effective dose (mSv)	0.2 (IQR: 0.1)	4.6 (2.2)	< 0.001
Simulated effective dose[1] (mSv)	0.1 (IQR: 0.0)	0.9 (IQR: 0.6)	< 0.001

[1] Analysis of 55 low-dose and 50 standard-dose cases

DLP dose length product, *$CTDI_{vol}$* computed tomography dose index

Les résultats de cette étude indiquent que l'imagerie CT LD de l'articulation claviculaire médiale pour l'estimation de l'âge est possible sans perte de confiance des lecteurs. En limitant la zone d'analyse à la seule clavicule, l'exposition aux radiations peut être réduite à l'équivalent d'environ 2 semaines de rayonnement de fond naturel [72].

Au total : Le scanner de l'extrémité sternale de la clavicule est une bonne méthode, qui couplée à d'autres (celles indiquées dans les recommandations de l'AGFAD), permet d'affiner les résultats. Même si les individus sont tous majeurs dès le stade 2b, il faut se référer au stade de fusion complète, le stade 4 des classifications de Schmeling et Kellinghaus, que tous les auteurs s'accordent à reconnaître comme le signe d'un âge au moins égal à 18 ans, et à être très prudent avec les subdivisions plus complexes [83].

Dans la pratique médico-légale, le scanner est considéré actuellement comme le meilleur examen pour l'analyse de la clavicule dans la détermination de l'âge à des fins juridiques [126] ; néanmoins, on s'aperçoit que plus le nombre de stades est important, plus il existe un risque d'erreurs. Il pourrait être envisagé une simplification de la classification en supprimant les stades intermédiaires, qui peuvent être sources d'erreurs dans l'interprétation de la lecture des scanners, et en examinant la clavicule selon le simple critère « fusionnée/non fusionnée ». En l'absence d'union complète de la clavicule, et même si la fusion paraît très avancée, l'ensemble des données disponibles encourage à ne pas conclure, sur la base du scanner seulement, à la minorité ou la majorité d'un individu [83].

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 une mineur. Le seuil des 21 ans est donc important dans le droit allemand, alors qu'il ne l'est pas en France. 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 [126].

b. Quelques inconvénients de la TDM :

- La radiographie en général et le scanner en particulier, exposent les individus à des radiations ionisantes, mais de façon différente. Une radiographie de la région main-poignet expose l'individu à une irradiation inférieure à 0,1 microsievert (Sv), une radiographie des clavicules à une irradiation d'environ 200 Sv et un scanner des clavicules à une irradiation comprise entre 600 et 800

Sv, suivant qu'il s'agit respectivement d'un scanner spiralé ou conventionnel (Jurik, 1996 ; Ramsthaler, 2009 ; Hillewig, 2011). 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 [126].

- La TDM est une des techniques plus irradiantes, qui a été récemment utilisée pour explorer la problématique de détermination de l'âge du vivant [62]. En effet, l'exposition à des fins médicales représente la première source des expositions artificielles de la population aux rayonnements ionisants, principalement du fait des examens scannographiques [11, 67]. Les examens d'imagerie ont prouvé leur apport, tant pour le diagnostic que pour le traitement. L'enjeu est toutefois d'éviter les examens qui ne sont pas vraiment nécessaires ou sans réel bénéfice pour les patients, ou dont le résultat est susceptible d'être obtenu par d'autres techniques disponibles non irradiantes [11].

  En fait, le souci relatif à l'assurance de la qualité en imagerie médicale concourt à la maîtrise des doses en exigeant la mise en œuvre opérationnelle des principes de « justification » des examens et d' « optimisation » des actes en scanographie plus particulièrement, avec une approche ciblant : les services d'urgence, les scanners pédiatriques (en raison de la radiosensibilité particulière des enfants), le consentement éclairé du patient et les démarches d'habilitation au poste de travail pour les personnels (médicaux et paramédicaux) [11].

  Les examens de scanographie, s'ils ne présentent pas d'enjeu majeur en matière de dose délivrée ou de débit de dose pour un individu, contribuent de façon très importante à l'exposition de la population liée aux actes de diagnostic médical, par la fréquence de leur utilisation. En effet, des études épidémiologiques récentes sur des travailleurs de l'industrie du nucléaire et sur des enfants et adolescents exposés à des rayonnements ionisants lors d'examen scanners retrouvent une augmentation du risque de cancers proportionnelle à la dose reçue qui reste significative, y compris lorsque l'intervalle étudié est restreint à des doses cumulées faibles inférieures à 100

milligrays (mGy), confortant ainsi ce qui jusqu'alors n'était qu'une hypothèse. Ces résultats consolident les connaissances sur l'impact des rayonnements ionisants à faibles doses et confirment l'importance des principes d'optimisation et de justification de chaque acte utilisant des rayonnements ionisants, pour la radioprotection des populations exposées [11].

- Les examens d'imagerie préconisés pour déterminer l'âge dans un contexte médico-légal, le scanner en particulier, sont irradiants, ce qui pose un problème éthique dans ce contexte d'examen sans bénéfice thérapeutique direct, chez des individus jeunes, parfois mineurs, non accompagnés par le majeur de leur choix [140].
- Enfin, l'examen TDM coûte cher par rapport à une radiographie conventionnelle [53].

4. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE (IRM) :

Selon le champ magnétique auquel ils sont soumis, les noyaux de certains des atomes qui composent la matière peuvent entrer « en résonance » : c'est le principe physique de la résonance magnétique nucléaire (RMN) [50].

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) produit des images par magnétisation du patient dans un tunnel formé d'un aimant très puissant qui émet des ondes de radiofréquence (RF) courtes de 46 MHz faisant résonner des protons mobiles qui ce sont les noyaux d'hydrogène dans les graisses, les protéines et l'eau. Lorsque les protons reviennent à leur état initial, ils restituent de l'énergie et produisent des échos de RF enregistrables sous forme d'un signal, capté par une antenne réceptrice, puis analysé par de puissants calculateurs. Grâce à des algorithmes mathématiques complexes, un traitement informatique permet de convertir leur densité ainsi que leur localisation en image tridimensionnelle, présentée en coupes successives [50, 149].

La détermination de l'AO peut se faire en imagerie médicale par la radiographie ou la TDM marquées par leur caractère irradiant surtout sur la physe [56]. Afin de supprimer l'irradiation des sujets lors de l'évaluation de la maturation squelettique, des études récentes se sont intéressées à l'apport d'un autre examen d'imagerie non irradiant et plus performant dans la détermination de l'âge : l'IRM [56, 126], bien qu'elle soit plus coûteuse [53, 62], et son utilisation reste encore limitée à la recherche [126].

La nécessité de comparer les résultats à des données déjà existantes, cela explique l'intérêt de refaire l'analyse sur les mêmes régions anatomiques déjà étudiées par les méthodes de référence connues. 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 cette technique d'imagerie, l'IRM, ainsi que le genou [126].

a. L'IRM et le cartilage de croissance :

L'IRM est l'examen idéal dans l'exploration du cartilage de croissance [53, 87], elle présente l'avantage de produire des images sur lesquelles le cartilage de conjugaison est facile à observer par un médecin non-radiologue [126].

L'IRM peut mettre en évidence l'existence d'un pont d'épiphysiodèse, et également sa nature. Il existe en effet des ponts d'épiphysiodèse de qualité différente, fibreux, cartilagineux, osseux. L'IRM va permettre non seulement de connaître la qualité fonctionnelle du cartilage de croissance restant, mais également la situation exacte et la nature du pont d'épiphysiodèse constitué. L'IRM peut également, dans certains cas, mettre en évidence la constitution d'un pont d'épiphysiodèse et la rupture spontanée de ce pont sous l'effet de la force développée par la croissance résiduelle [87].

L'ensemble de ces éléments, ainsi que le caractère non irradiant de l'IRM en font un examen de choix dans l'exploration des lésions du cartilage de croissance [87].

Par ailleurs, le chirurgien orthopédiste, directement concerné par les perturbations locales de la croissance, lors de la constitution d'une épiphysiodèse, l'IRM s'est affirmée comme l'examen de choix pour s'orienter vers un traitement palliatif ou une désépiphysiodèse [87].

b. L'IRM et l'évaluation de la maturation osseuse :

La radiographie et le scanner exposent, indifféremment, les individus à des radiations ionisantes. Afin de supprimer l'irradiation des sujets évalués, des études récentes se sont intéressées à l'apport de l'IRM dans la détermination de l'âge en étudiant plusieurs articulations [126].



Figure 46 : L'aspect IRM d'une rupture spontanée d'un pont épiphysiodèse sous l'effet de la croissance restante [87]

<u>Etude à l'IRM de la maturation métaphyso-épiphysaire du poignet et de la main :</u>

La plupart des études du poignet par IRM se sont inscrites dans un contexte particulier, pour la détermination de l'AR de joueurs de football. En 2003, la Fédération Internationale de Football Association (FIFA) avait remarqué une discordance entre l'AR allégué par les joueurs de football inscrits dans les

compétitions internationales et leur apparence physique, ce qui a conduit à appliquer un protocole d'étude de l'IRM du poignet aux footballeurs dans les compétitions et de révéler un grand nombre d'irrégularités. Ces études ont donc été réalisées sur des populations d'hommes jeunes, sportifs, en bon état général, seulement ne comprenant pas de femmes, ils ne peuvent pas être alors utilisés comme référence ici (voir plus bas) [126, 140].

L'étude à l'IRM de la maturation métaphyso-épiphysaire intéresse trois indicateurs osseux du poignet et de la main, qui sont : l'épiphyse distale du radius, l'épiphyse distale de l'ulna et la base du premier métacarpien [140].

Cette maturation va passer par trois stades, comme suit :

- Stade 1 : Absence de fusion métaphyso-épiphysaire
  Visuellement, il existe une « bande noire » matérialisant l'espace séparant la métaphyse et l'épiphyse (Fig. 47) [140].
- Stade 2 : Fusion partielle métaphyso-épiphysaire
  Il existe au moins une zone de fusion sur une des images, matérialisée par une région plus floue entrainant une discontinuité de la « bande noire ». Sur au moins une image, il persiste une zone sans union (Fig. 48) [140].



Figure 47 : Stade 1 en séquence coronale : absence de fusion du cartilage de croissance. Présence d'une « bande noire » séparant la métaphyse et l'épiphyse des radius et ulna (A, B) et premier métacarpe (C, D) [140]

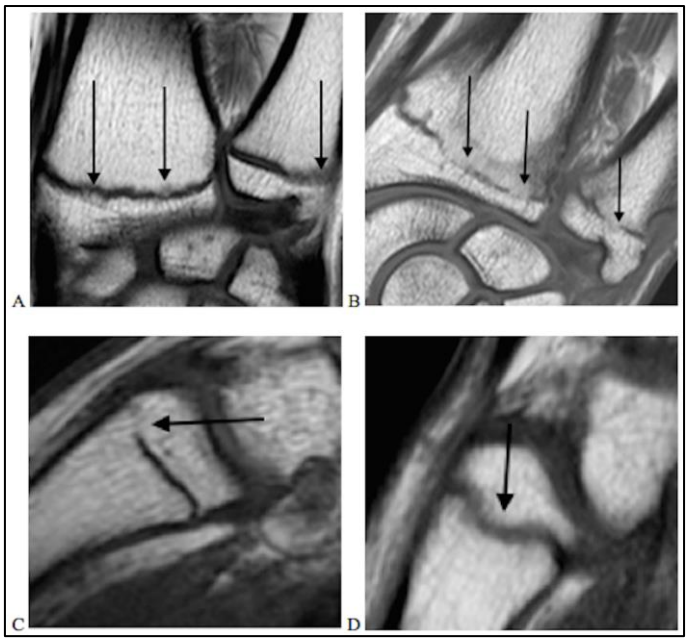


Figure 48 : Stade 2 en séquence coronale : fusion partielle du cartilage de croissance. Apparition de zones grises correspondant à un début d'ossification entrainant une discontinuité au niveau de la « bande noire » séparant la métaphyse et l'épiphyse (Flèches) des radius et ulna (A, B), et premier métacarpe (C, D) [140]

- <u>Stade 3 :</u> Fusion complète métaphyso-épiphysaire

  Il persiste parfois une fine zone linéaire appelée ligne (ou cicatrice) épiphysaire, sur toutes les images d'une série (Fig. 49) [140]. Baumann et al. (2009) ont observé ces 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 [126].



Figure 49 : Stade 3 en séquence coronale : fusion totale du cartilage de croissance. Disparition complète de la « bande noire » séparant la métaphyse et l'épiphyse des radius et ulna (A, B), et premier métacarpe (C, D) au profit d'une ossification complète (zone blanche) [140]

Le travail cherche à déterminer si l'étude de la maturation métaphyso-épiphysaire de trois indicateurs osseux du poignet et de la main (épiphyses distales du radius et de l'ulna et base du premier métacarpien) à l'IRM permettait d'évaluer correctement l'âge d'un individu par rapport au seuil des 18 ans, qui est le plus important dans la pratique médico-légale [140].

L'analyse conjointe du radius, de l'ulna et du premier métacarpe n'apporte pas de précision supplémentaire par rapport à l'analyse du radius seul. L'analyse du radius seul paraît donner de meilleurs résultats que celle de l'ulna, permettant d'évaluer avec un peu plus de précision les femmes mineures. Concernant la comparaison entre radius et métacarpe, on note que l'évaluation du métacarpe est très bonne pour les majeurs mais ne l'est pas pour les mineurs. L'analyse de cet indicateur seul peut conduire à des erreurs chez les mineurs, qui seront évalués comme majeurs dans un nombre important de cas. Aussi, les résultats de l'analyse de l'épiphyse distale du radius seul paraissent plus intéressants, conduisant à moins d'erreurs et ce quel que soit le sexe [140].

Au total, l'évaluation conjointe des trois os ne paraît pas absolument indispensable. L'analyse d'un seul os constitue un gain de temps et facilite l'apprentissage de la méthode [140].

Les avantages de l'IRM dans l'estimation de l'âge ont été confirmés par cette étude : en dehors du caractère non irradiant bien sûr, on note le fait que l'évaluation de la fusion entre la métaphyse et l'épiphyse est facile même pour un médecin non radiologue, car les zones de fusion éventuelles sont bien visibles à l'œil nu sans entraînement particulier. Les bons résultats des variabilités intra- et inter-observateurs témoignent de cette facilité d'analyse [140].

Le choix du nombre de stades dans la classification adoptée est important : il existe des classifications à trois, quatre, cinq ou six stades, dépendants de la quantité de zones fusionnées sur la jonction métaphyso-épiphysaire. Le fait d'avoir plusieurs stades pour qualifier la fusion en cours peut se traduire par un affinement des fourchettes d'âge correspondant à chaque stade, mais également un chevauchement de ces fourchettes. Une classification à trois stades était le système le plus simple, nécessitant le temps d'apprentissage le moins long. La distinction entre l'absence de fusion, une fusion en cours et la fusion complète, est facile à faire sur une acquisition par IRM, même pour un praticien non radiologue. Ces conditions sont celles qui se rapprochent le plus de la pratique médico-légale, car les médecins légistes requis pour l'estimation de l'âge sont des cliniciens qui ne travaillent pas toujours conjointement avec un radiologue, même si cela est recommandé [140].

Etude à l'IRM de la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule :

La classification de Schmeling (2004) a été utilisée pour l'analyse de l'extrémité médiale de la clavicule par IRM [126].

L'étude de Hillewig (2011) s'est intéressée à l'examen IRM d'individus vivants et la comparaison des résultats avec des radiographies de clavicules pour les mêmes

sujets. 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. Il était plus facile de déterminer le stade de maturation osseuse sur les images d'IRM que sur les radiographies [126], et la variabilité intra- et inter-observateur était meilleure avec l'IRM qu'avec la radiographie, ce qui témoigne de la facilité de l'analyse [126, 140]. Enfin, la cicatrice épiphysaire (stade 4) n'a jamais pu être identifiée par les examinateurs [126].

L' étude de Hellewig (2013), basée sur les constatations précédentes, a conduit à analyser un échantillon de 220 individus en comparant les résultats de l'IRM à partir de deux classifications, celle de Schmeling, et celle de Kreitner (1998), à 4 stades, le dernier stade étant celui de la fusion complète, sans tenir compte de la présence ou pas d'une cicatrice épiphysaire. Ces différents stades ont été comparés avec l'âge évalué par la méthode de GP sur une radiographie de main-poignet pour les mêmes individus. 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 [126], et de déterminer qu'un individu dont la clavicule était fusionnée (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 [126, 140].

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 [126].

Tangmose et al. (2013) ont montré aussi, 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 [126].

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 GP devait nécessairement être effectuée simultanément pour affiner les résultats [126].

Tableau 10 : Les principaux résultats des études sur l'IRM de la maturation l'extrémité médiale de la clavicule [126]

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

Deux classifications IRM de la maturation de l'extrémité médiale de la clavicule :

- <u>En quatre stades [60, 126] :</u> Schmidt et al. (2007) ont ajouté un quatrième stade pour l'étude de l'extrémité médiale de la clavicule (fig. 50).
  - A : Stade 1 – le centre d'ossification absent (n'est pas ossifié) (fille : 7,7 ans) ;
  - B : Stade 2 – le centre d'ossification est ossifié, absence de fusion épiphysaire (flèche) (fille : 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)

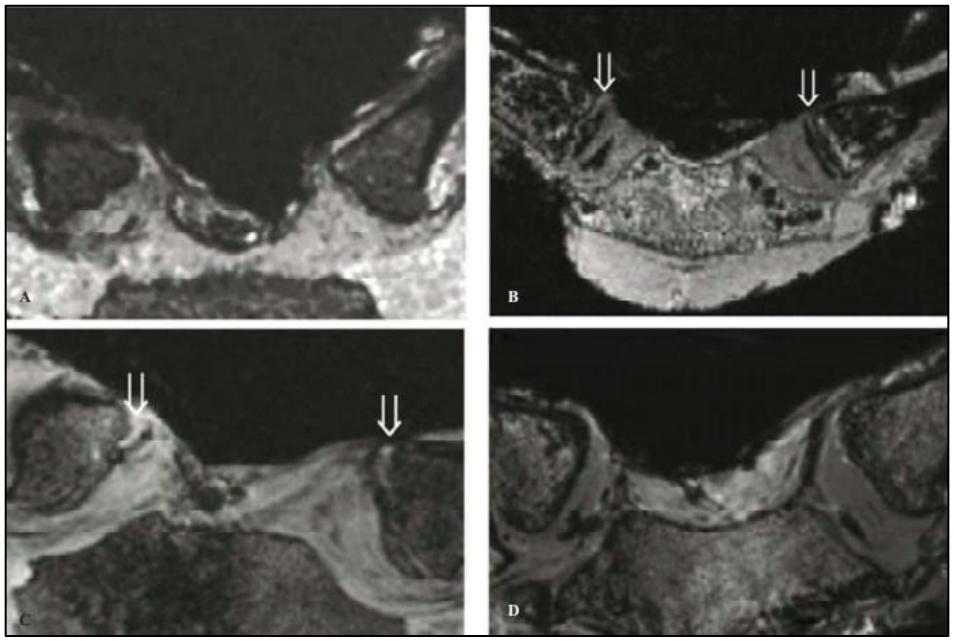


Figure 50 : Classification en 4 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. D'après Schmidt (2007) [126]

- <u>En cinq stades [126] :</u> classification classique de Schmeling (2004) 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).
  - 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

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, 2004) de l'extrémité médiale de la clavicule, qui a été appliquée successivement sur les radiographies, les scanners et les IRM.

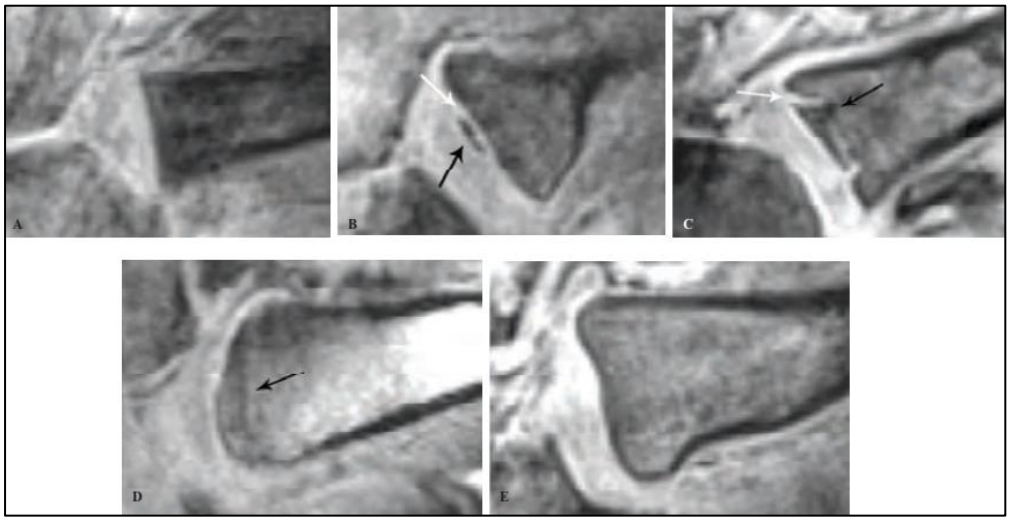


Figure 51 : Classification en 5 stades de l'extrémité médiale de la clavicule. D'après Hillewig (2013) [126]

Le stade 4 correspond à une fusion complète de l'épiphyse, avec persistance d'une cicatrise 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'AO [126].

Etude à l'IRM de la maturation métaphyso-épiphysaire du genou :

L'IRM du genou est un examen utilisable pour évaluer l'AO d'individus vivants masculins et féminins au-delà de l'âge de 16 ans [47], bien qu'il ne soit pas utilisé en pratique, le genou n'étant pas une zone étudiée en routine dans ce contexte [140].

Il existe une différence chronologique de maturation entre les physes distales fémorales et proximales tibiales en IRM. La fusion complète se faisant plus précocement sur le versant tibial [47].

Il existe également une différence significative de maturation sur les deux versants physaires entre les individus de sexe féminin et de sexe masculin, avec une avance des différents stades féminins sur les stades masculins [47].

Deux études IRM sur le genou ont été publiées [126, 140] :

- L'étude de Jopp (2010), 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 16ème année. 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. Il s'agit du système le plus simple (3 stades), peu utilisé dans les études existantes [126].

L'étude adopte au genou **trois stades** sur des séquences IRM pondération T1 [126] :

- A : Stade 1 – absence de fusion ;
- B : Stade 2 – fusion partielle (quel que soit son avancée) ;
- C : stade 3 : fusion complète



Figure 52 : Classification en 3 stades des épiphyses du genou. D'après Jopp (2010) [126]

- L'étude de Dedouit et al. (2012), portait sur 290 individus des deux sexes, âgés de 10 à 30 ans, pour lesquels des coupes coronales ont été lues selon une classification originale en 5 stades pour étudier le genou, basés sur l'épaisseur de la jonction épiphyso-métaphysaire et de son aspect lamellaire du cartilage de l'épiphyse distale du fémur et de l'épiphyse proximale du tibia [60, 126].

  Cette étude adopte au genou **cinq stades** sur des séquences IRM pondération T2 (ou DP fat SAT) [126] :

  - 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 physaire à la jonction métaphyso-épiphysaire

  La fusion complète métaphyso-épiphysaire de l'épiphyse distale du fémur chez les hommes, visible sur des séquences pondérées en T1 d'IRM du genou, est un indicateur permettant de déterminer si une personne est âgée de plus ou moins de 18 ans, elle atteste de la majorité pénale d'après

plusieurs études récentes [140]. 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 [126].

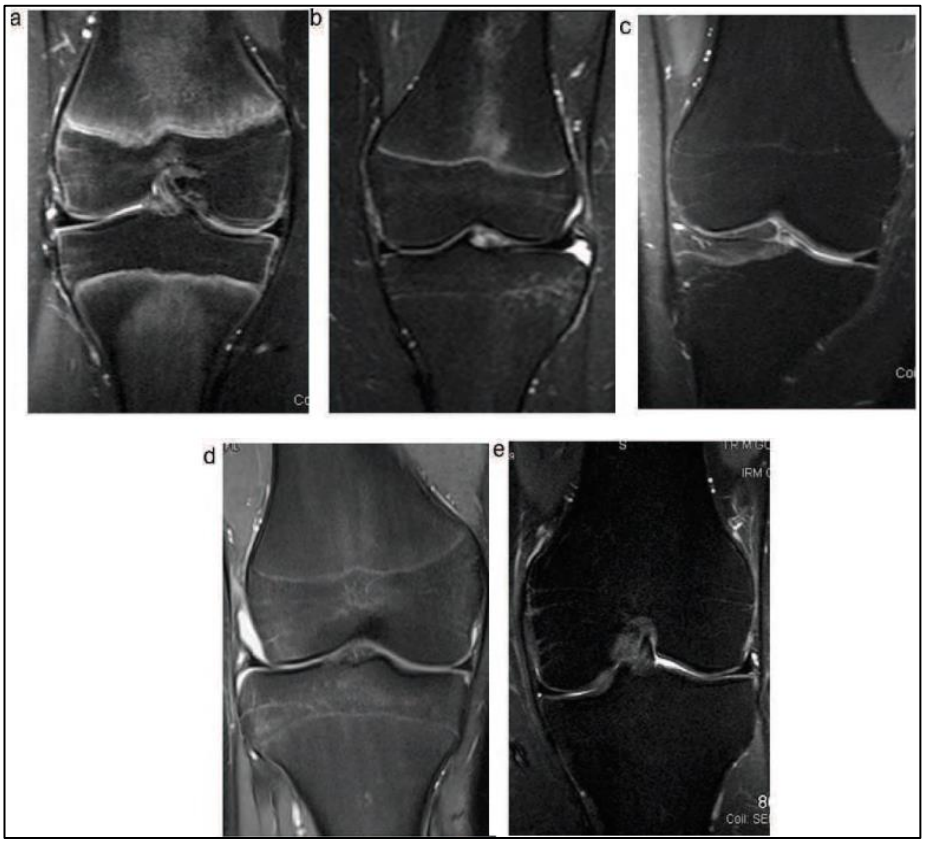


Figure 53 : Classification en 5 stades des épiphyses du genou. D'après Dedouit (2009) [126]

Même s'il existe des chevauchements entre les différents stades qu'ils soient physaires fémoraux ou tibiaux, l'étude a permis de retenir que la fusion complète (stade 5) est atteinte le plus précocement aux âges suivants [47] :

- pour l'échantillon masculin :
  - versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 23 ans,
  - versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 19 ans,
- pour l'échantillon féminin :
  - versant fémoral distal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 22 ans,
  - versant tibial proximal : le stade 5 est en faveur d'un âge supérieur à 17 ans.

Ces résultats en IRM concernant les âges les plus précoces auxquels la fusion complète est atteinte, que cela soit sur les versants fémoraux ou tibiaux est en désaccord avec les âges radiographiques fournis par Pyle et Hoerr. Il

apparait donc que la fusion complète a été décrite par Pyle et Hoerr comme pouvant être acquise plus précocement qu'en IRM [47].

L'explication la plus probable concernant le désaccord entre la radiographie et l'IRM est que dans les cas où la radiographie permet le diagnostic d'une fusion complète, l'IRM, de par sa meilleure résolution spatiale et en contraste est plus discriminante et peut permettre de différencier parmi ces individus des stades IRM 3, 4 ou 5. Plusieurs exemples permettent de comprendre ce phénomène (clichés ci-dessous). La résolution en contraste de l'IRM permet facilement le diagnostic d'œdème et donc d'hypersignal à la jonction métaphyso-épiphysaire, zone où la radiographie simple peut diagnostiquer de façon erronée une fusion métaphyso-épiphysaire complète [47].



Figure 54 : Confrontation entre les radiographies et les IRM de genoux obtenues chez des individus présentant en radiographie standard du genou de face, un aspect de fusion complète au versant fémoral, identique pour l'ensemble des individus.
L'IRM du genou permet chez ces mêmes individus de constater que leur stade de maturation au versant physaire fémoral est différent : l'individu de la figure A présente un stade fémoral IRM 3, l'individu B un stade 4, et l'individu C un stade 5 [47]

Les variabilités inter- et intra-observateurs concernant la stadification de l'épiphyse distale du fémur par rapport à l'épiphyse proximale du tibia étaient excellentes, témoignant de la facilité de cette analyse [47, 60, 126, 140] : la stadification est applicable de façon fiable par un médecin non radiologue, élément indispensable pour que la technique soit utilisée et diffusée largement [47].

Etude à l'IRM de la maturation métaphyso-épiphysaire de la cheville :

Cette étude IRM s'intéresse à l'épiphyse distale du tibia et l'épiphyse du calcanéus [126]. L'intérêt de l'étude du tibia et du calcanéus 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 calcanéus. L'étude de ces épiphyses a donc sa place dans l'observation de la maturation osseuse [126].

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 [126].

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, 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. Bien que moins explorée que le crâne, le rachis ou le genou, la cheville est une zone anatomique faisant fréquemment l'objet des examens IRM [126].

Les structures anatomiques étudiées sont présentées sur la figure 55 [126] :

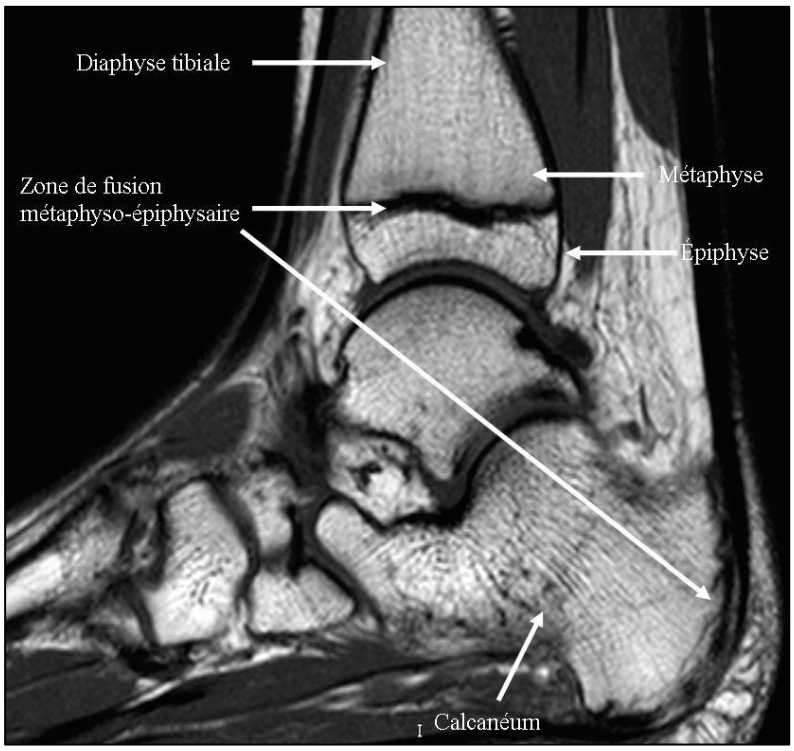


Figure 55 : IRM de la cheville et du pied, coupe sagittale (fille, 12 ans).
Les structures anatomiques étudiées sont présentées par des flèches blanches [126]

La maturation de l'épiphyse distale du tibia et de l'épiphyse du calcanéus va passer par trois stades, comme suit [126] :

- <u>Stade 1 :</u> Absence de fusion métaphyso-épiphysaire

  Il y a un espace entre la métaphyse et l'épiphyse, avec une absence totale d'union sur toutes les images. 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.

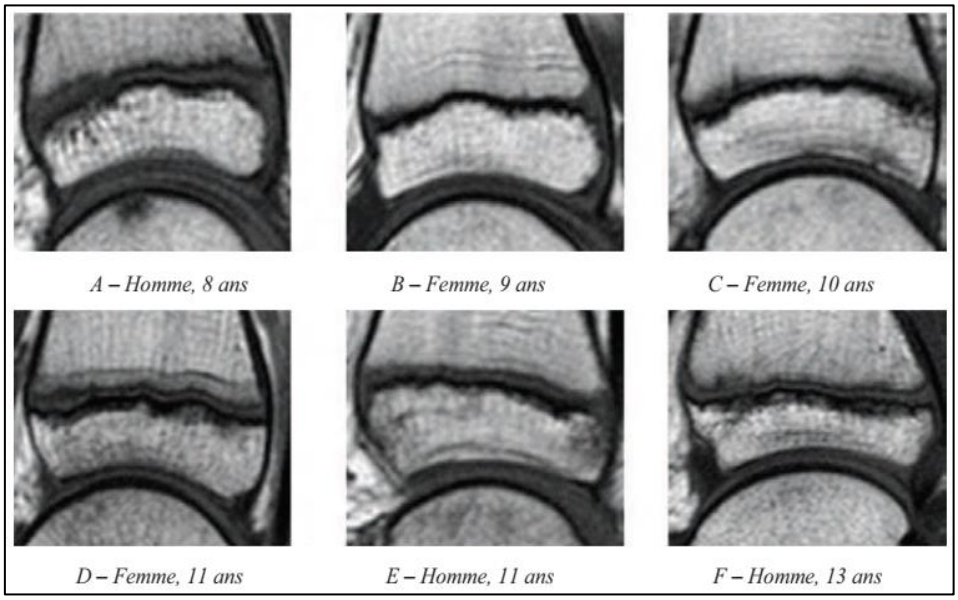


Figure 56 : Stade 1 de l'épiphyse distale du tibia. Aucune zone de fusion n'est visible, l'espace entre la métaphyse et l'épiphyse apparaissant à l'écran comme une bande noire. Un aspect lamellaire est visible sur les figures A, D, E et F, sous forme d'une bande gris foncé [126]

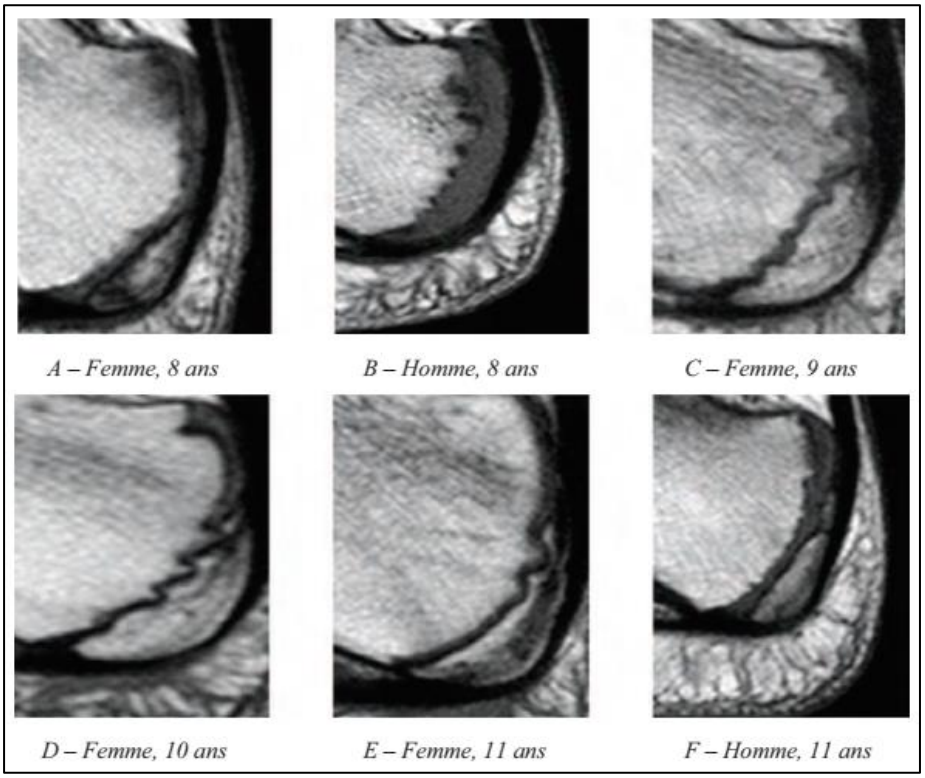


Figure 57 : Stade 1 de l'épiphyse du calcanéus. Un aspect lamellaire est visible sur les figures A, C, E, F [126]

- <u>Stade 2 :</u> Fusion partielle métaphyso-épiphysaire
  L'espace entre la métaphyse et l'épiphyse n'est pas continu. Sur au moins une image, 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 minime, 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.

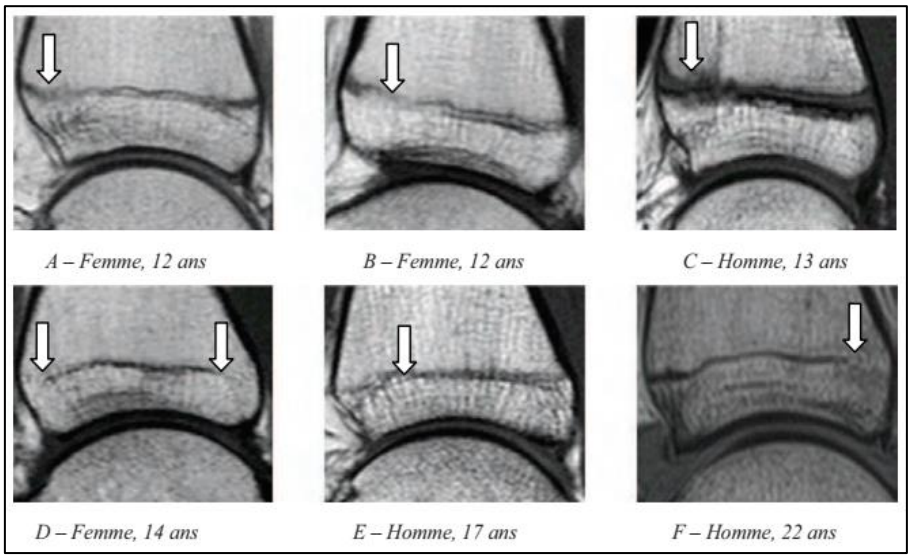


Figure 58 : Stade 2 de l'épiphyse distale du tibia. Zones plus ou moins étendues de fusion (flèches blanches) [126]

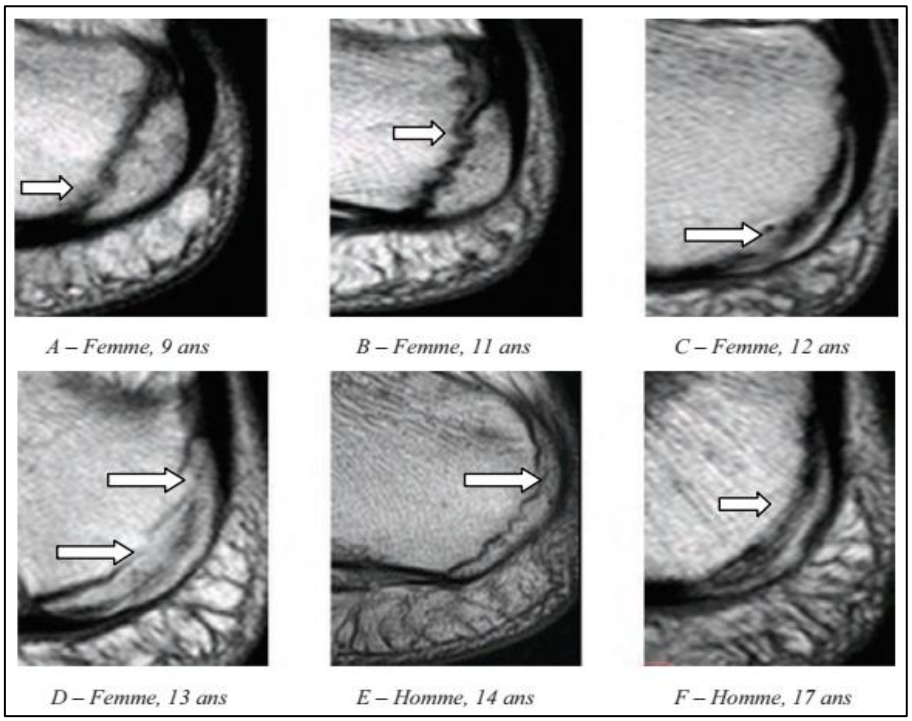


Figure 59 : Stade 2 de l'épiphyse du calcanéus. Zones plus ou moins étendues de fusion (flèches blanches) [126]

- <u>Stade 3 :</u> fusion complète métaphyso-épiphysaire
  L'épiphyse et la métaphyse sont unies sur toutes les images. Une fine ligne horizontale est parfois visible, correspondant à une cicatrice épiphysaire.

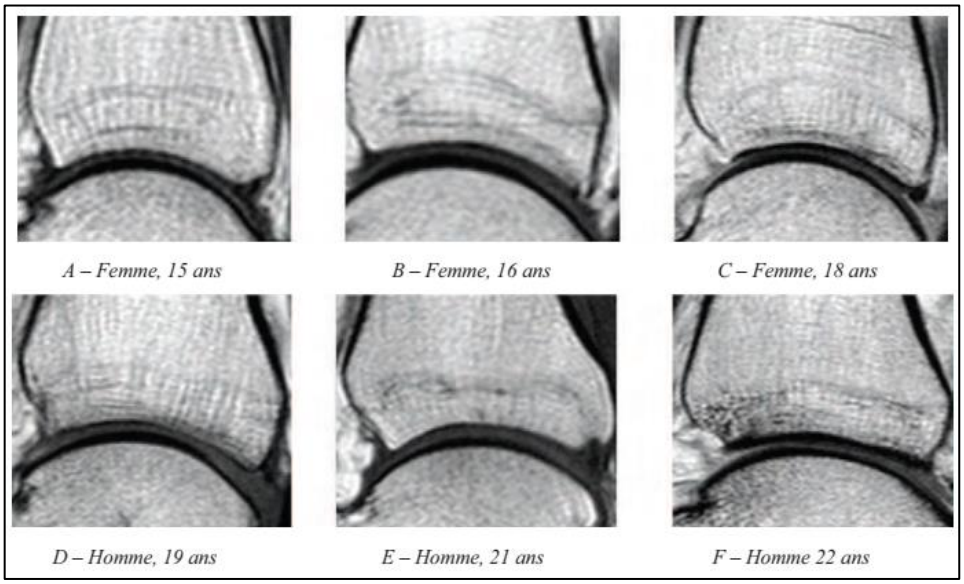


Figure 60 : Stade 3 de l'épiphyse distale du tibia [126]

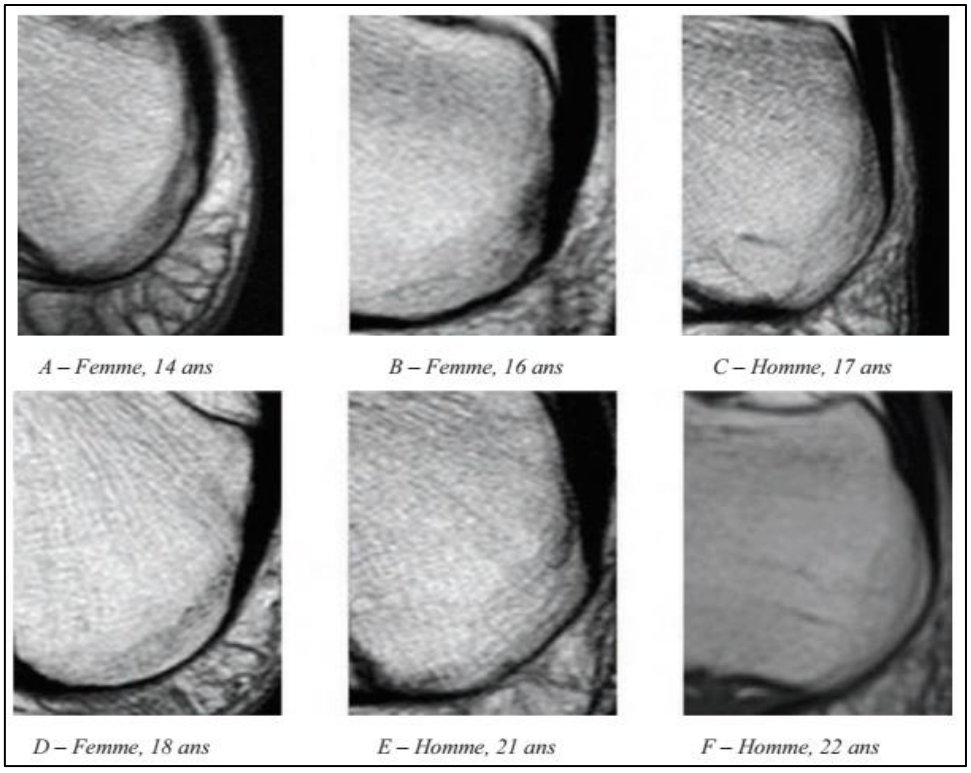


Figure 61 : Stade 3 de l'épiphyse du calcanéus [126]

Pour l'épiphyse 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 20 ans chez les femmes et 22 ans chez les hommes. Par ailleurs, les âges transitionnels étaient plus tardifs pour l'épiphyse distale du tibia que pour le calcanéus, pour les deux sexes [126].

Ces données sont précises, puisque 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. De même, la fusion complète peut être affirmée avec certitude sur la totalité de la surface épiphysaire, et sur toutes les images. 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 [126].

Aussi, 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'épiphyse distale du tibia et le calcanéus. Cette différence est bien connue dans la littérature sur la fusion métaphyso-épiphysaire (Scheuer, 2000), les femmes ayant une avance sur les hommes allant de plusieurs mois à un ou deux ans, quelle que soit la structure anatomique testée. 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 [126].

N.B. : La présence d'une cicatrice ou ligne épiphysaire est une notion déjà débattue pour qu'elle soit prise en compte [126]. En effet, après l'ossification, des vestiges de la soudure de la diaphyse avec l'épiphyse paraîtront encore pendant un ou deux ans sous forme de lignes plus claires et la disparition de celles-ci indique ensuite le passage à l'âge adulte [63]. Des auteurs (Cope, 1920) ont suggéré que la cicatrice épiphysaire, distale du fémur et proximale du tibia, pouvait rester visible pendant plusieurs dizaines d'années, jusqu'à 60 voire 70 ans. Pour d'autres (Hoerr, 1962), la ligne épiphysaire distale du tibia peut persister toute la vie. Une étude récente (Davies, 2013) a montré qu'une cicatrice épiphysaire était présente sur plus de 92 % de 1216 radiographies de tibias d'individus âgés de 20 à 50 ans. De même, la présence d'une ligne épiphysaire sur de nombreuses IRM d'hommes et de femmes dont la maturation osseuse était achevée (Saint-martin, 2014). En raison de ces données contradictoires de la littérature, il semble que cette notion n'est pas un élément assez fiable pour définir le caractère récent de la fusion épiphyso-métaphysaire et constituer un stade à part entière [126].

c. L'IRM et l'évaluation de la maturation osseuse dans le domaine du SPORT :

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) occupe une place importante dans la détermination de l'AO au cours des compétitions sportives. En effet, lors des tournois de football à limite d'âge préfixée, des lois sont établies pour garantir des chances égales aux participants, parmi elles : l'étude de la maturation osseuse pour la détermination de l'âge [56].

La sélection des footballeurs de haut niveau de moins de 17 ans (U-17) repose sur des critères d'âge. En effet, le regain d'intérêt pour cette discipline sportive, surtout lors des compétitions des moins de 17 ans, fait craindre la participation de joueurs hors catégories. La fraude sur l'âge dans le sport de haut niveau est un sujet d'actualité en particulier chez les footballeurs U-17 [12, 56] : pour limiter les fraudes, la Fédération internationale de Football Association (FIFA) a recours à la détermination de l'AO via l'IRM du poignet gauche chez ces candidats [12].

Ces soupçons autour de l'âge biologique des participants sont fondés : L'âge inscrit sur les documents officiels (passeports, actes de naissance, papiers d'identités) qui détermine l'éligibilité du joueur n'est pas souvent l'âge « réel » de l'intéressé (détermination rétrospective de l'âge inexacte, établissement du certificat douteux). Cette situation est aggravée dans les pays où l'enregistrement à la naissance n'est pas obligatoire et systématique [12, 56], pour cette raison, les fédérations sportives internationales et en particulier la FIFA ont recours à la détermination de l'AO afin de garantir l'égalité des chances des participants [12].

En effet, l'étude de la maturation osseuse permet dans le domaine des compétitions internationales de football d'offrir des chances égales de succès à toutes les équipes. Cette étape est essentielle et crédible pour attirer l'attention des autorités dans l'établissement des documents administratifs [56].

Plusieurs méthodes existent parmi lesquelles celle recommandée par les experts du groupe d'étude international et interdisciplinaire sur la détermination de l'âge à visée médicolégale qui préconise un examen clinique et dentaire avec réalisation concomitante d'une radiographie de la main gauche et d'un panorex dentaire, complétés par une radiographie ou un scanner du bord médial des clavicules si le développement radiologique osseux de la main est terminé [12]. À ces méthodes radiologiques, jugées imprécises, irradiantes [12, 56] et non éthiques dans le milieu sportif [59], se substitue l'examen en IRM du poignet gauche [12, 56], avec une bonne reproductibilité inter-observateur et une corrélation entre âge squelettique et âge civil comparable [12]. La mise en application de la méthode IRM, a conduit à l'exclusion de certains joueurs à la phase éliminatoire, voire en phase finale de la compétition [56].

Les radiographies standards, alors, ne peuvent pas être justifiées comme outil de dépistage pour les populations de footballeurs, l'estimation de l'âge sur la base de l'évaluation de la fusion de l'épiphyse distale du radius par IRM s'est récemment révélée être une méthode fiable et valide chez les joueurs de football entre 14 et 19 ans [59]. Cette adoption du « radius » est celle proposé et retenu par quelques travaux [56].

Historique :

En 2003, la FIFA, qui avait remarqué une discordance entre l'AC et l'apparence physique de certains jeunes joueurs dans les compétitions, a mis en place un protocole simultanément à Zurich (Suisse), Kuala Lumpur (Malaisie), Buenos Aires

(Argentine) et Alger (Algérie) pour tester 496 joueurs de football âgés de 14 à 19 ans dont l'AC était avéré par un certificat de naissance « fiable » [126].

En évitant que les joueurs soient exposés à l'irradiation causée par un cliché radiographique de la main, des 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 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 [126].

Une IRM de poignet a ensuite été faite sur les 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. En 2009, lorsque la FIFA a annoncé un renforcement de ces contrôles, certains entraîneurs ont changé jusqu'à 15 joueurs de leur équipe [126]. Depuis cette année, et chez la plupart des auteurs, il existait une similitude entre l'âge déclaré, c'est-à-dire validé par les documents administratifs, et l'âge « osseux », c'est-à-dire déterminé par examen IRM [56].

Le protocole initial a été élargi en Malaisie (George, 2012), 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 [60, 126].

Etude de Dvorak et classification IRM de la maturation squelettique :

L'étude de Dvorak et coll. avait comme objectif d'étudier l'utilisation possible de l'IRM, qui ne présente aucun risque radiologique, pour estimer l'âge d'adolescents footballeurs en bonne santé [59].

Pour ces auteurs : une telle méthode d'examen sans rayons X pourrait être utilisée dans tous les sports en cas de divergences ou de suspicion qu'une date de naissance présentée soit inappropriée, l'intérêt est à l'ensemble de la communauté sportive et le Comité international olympique, où l'âge détermine les catégories en compétition. Cela pourrait intéresser aussi les pédiatres, lorsqu'ils traitent de troubles endocrinologiques, et également les tribunaux, lorsqu'ils traitent des infractions pénales commises par des mineurs. L'IRM offre une alternative en tant que méthode d'examen non invasive [59].

Dans le sport, notamment dans le football, les compétitions ont été conçues selon des tranches d'âge pour garantir l'égalité des chances. La nécessité d'une méthode alternative pour déterminer l'âge et la maturité a été soulevée par l'organisme de réglementation de l'Agence internationale de l'énergie atomique, qui n'autorise l'examen aux rayons X que lorsque cela est cliniquement justifié pour l'individu, ce

qui n'est pas le cas pour la détermination de l'âge dans le sport ou même dans des situations médico-légales, sauf lorsqu'il existe une ordonnance du tribunal, fondée sur des accusations criminelles [59].

L'étude de Dvorak a portée sur 496 footballeurs de sexe masculin, d'origines diverses des 4 Continents : Africain (Algérie), Européen (Suisse), Asiatique (Malaisie) et latino-américaine (Argentine), et d'âges compris entre 14 et 19 ans [12, 59].

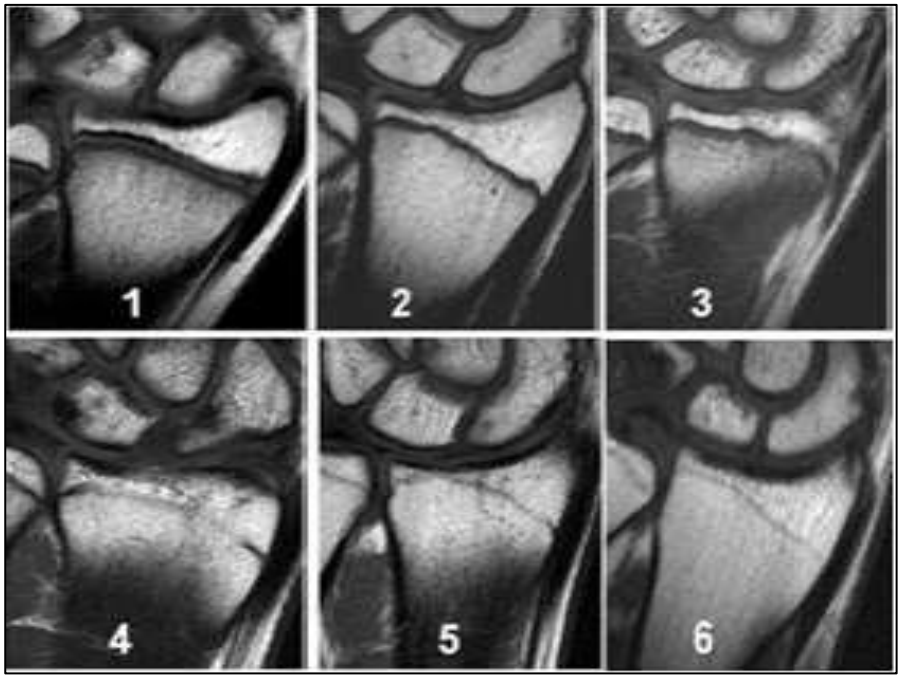
Tableau 11 : La classification de la fusion en fonction des moyennes d'âge (avec DS) dans différents pays [59]

	I	II	III	IV	V	VI
Argentina	15.2 (0.86) n=16	15.9 (0.97) n=51	16.2 (0.69) n=6	17.0 (0.90) n=19	17.8 (0.77) n=42	18.1 (0.87) n=4
Malaysia	15.9 (1.2) n=7	16.1 (0.79) n=41	16.0 (0.65) n=10	17.4 (0.95) n=18	18.1 (1.28) n=36	18.4 (1.1) n=15
Algeria	15.7 (0.58) n=29	16.7 (0.81) N=52	16.7 (0.78) n=11	17.2 (1.31) n=7	18.1 (1.00) n=18	17.9 (0.62) n=3
Switzerland	15.8 (0.55) n=20	16.5 (0.78) n=33	17.4 (0.96) n=18	17.3 (0.76) n=13	17.9 (1.05) n=21	18.2 (0.76) n=6

Le système de notation présenté par l'étude, basé sur des critères clairs et simples même pour un non-radiologue [59], identifie clairement différents degrés de fusion épiphysaire distale du radius, en six stades [12, 56, 59] :

- Stade I : absence de fusion du cartilage ;
- Stade II : fusion punctiforme du cartilage (début de fusion) ;
- Stade III : fusion inférieure à 50 % du cartilage ;
- Stade IV : fusion supérieure à 50 % du cartilage ;
- Stade V : physe résiduelle inférieure à 5 mm ;
- Stade VI : fusion complète.

-



Stade	Signes IRM
I	Absence de fusion du cartilage
II	Fusion punctiforme du cartilage
III	Fusion du cartilage < 50 %
IV	Fusion du cartilage > 50 %
V	Physe résiduelle < 5 mm
VI	Fusion complète du cartilage

- **Figure 62 et Tableau 12 : Classification des stades de fusion de la physe radiale distale gauche en IRM, selon Dvorak et coll. [12, 56, 59]**

La fusion complète se produit entre 17 et 18 ans dans les groupes ethniques examinés, avec une maturation plus rapide chez les garçons argentins et malaisiens que chez les garçons algériens et suisses. L'âge moyen des participants présentant une fusion complète du radius était de 18,3 ans (ET = 0,9), ce qui indique qu'il est très peu probable qu'une fusion complète se produise à 17 ans [59]. Le tableau 12 établit une corrélation entre l'âge et le stade de fusion de la physe radiale distale.

Tableau 13 : Le nombre de participants à l'étude Dvorak, avec la moyenne d'âge par différents stades de fusion du cartilage de la physe radiale, selon Dvorak et coll. [59]
(SD : déviation standard ; IC : intervalle de confiance)

	Count	Mean	SD (95% CI)
I	72	15.64	0.74 (15.5 to 15.7)
II	177	16.29	0.90 (16.2 to 16.4)
III	45	16.78	0.98 (16.5 to 17.1)
IV	57	17.21	0.93 (17.0 to 17.5)
V	117	17.98	1.03 (17.8 to 18.2)
VI	28	18.27	0.91 (17.9 to 18.7)

A la fin de cette étude, les auteurs insistent sur l'importance de l'IRM du poignet qui offre une alternative en tant que méthode non invasive d'examen de la fusion épiphysaire et de détermination de l'âge chez les adolescents de sexe masculin âgés de 14 à 19 ans. Le système de notation peut identifier avec précision les degrés variables de fusion épiphysaire, de manière objective et enseignable, et par conséquent la maturation squelettique par fusion complète dans toutes les coupes IRM, ce qui élimine tout risque associé à l'évaluation radiographique standard telle que déterminée par l'Agence internationale de l'énergie atomique [59]. L'étude de Dvorak et coll. s'est servi de référence à la FIFA après qu'elle l'ait validé [12].

Déroulement de l'examen IRM :

- L'accueil : après élimination de toute contre-indication à la réalisation d'une IRM, cet examen est précédé d'un contrôle d'identité avec interrogatoire rapide sur l'existence d'antécédents chirurgicaux ou traumatiques du poignet gauche. Un examen succinct permet ensuite de rechercher un éventuel trouble de la croissance [12].
- L'installation du sujet : des conditions préparatoires à l'examen doivent être respectées. Il y a plusieurs [12, 56] :
  - Le sujet mis en procubitus (décubitus ventral) ;
  - Le membre thoracique gauche est surélevé au-dessus de la tête. Le membre thoracique peut-être allongé le long du corps, à la convenance des équipes : il n'y a pas de différences dans l'acquisition de l'image entre ces deux techniques ;
  - Le poignet gauche en extension dans une antenne de surface ; le poignet gauche est l'articulation de choix pour l'étude. Elle est facile d'accès et n'expose pas aux risques d'erreurs. Son exploration n'induit pas d'exposition d'une autre partie du corps ou d'un autre organe ;
  - Le 3ème métacarpien aligné sur l'axe radial ;
  - Il est demandé au sujet de ne pas bouger.



Figure 63 : Antenne IRM de poignet O-scan. Medical Expo [Antenne IRM de poignet - O-scan - Esaote - en réseau phasé (medicalexpo.fr)]

- Le choix de la machine : ce choix portera le plus fréquemment sur des machines de bas champs magnétiques (0,2 T ou 0,3 T) habituellement dédiées pour l'imagerie ostéo-articulaire, qui permettent d'obtenir des images capables de faire la stadification des joueurs. Par ailleurs, il est à noter que les machines à champs magnétiques plus élevés (1 à 1,5T ou 3 T) ont été aussi utilisées par d'autres auteurs (Dvorak, Verma, Soeghiharto) [12, 56].
- La séquence : une seule séquence coronale est réalisée, d'une épaisseur de coupe de 3 mm, puisque les coupes nécessaires à la stadification sont les coronales. La séquence coronale est pondérée en T1, cette séquence est celle utilisée par d'autres auteurs. Les expertises du centre d'évaluation et de

recherche médicale de la FIFA ont reconnu que la séquence pondérée en T1 permet, par la netteté de l'image, l'analyse fine de la physe et de la zone de jonction avec l'os pour une détermination de l'AO dans des conditions idoines. Cette séquence anatomique de la pratique quotidienne en imagerie ostéo-articulaire est appelée « séquence morphologique », elle est intéressante car elle permet l'étude du cartilage de croissance et celle des os du carpe. Toutes ces conditions répondent aux consignes de radioprotection définies par l'AIEA interdisant une exposition aux radiations ionisantes si cette dernière ne vise pas l'amélioration de l'état de santé du sujet à exposer [12, 56].

- La durée de d'examen : on comptant celle de l'installation, du positionnement et de l'acquisition, la durée est de 5 à 7 minutes [12, 56].
- La lecture : elle se fait directement sur consoles à partir des images natives après repérage de la physe radiale distale. L'analyse s'intéresse à l'épaisseur, aux bords et à l'aspect de la physe radiale. Ces informations recueillies sont comparées à l'abaque de Dvorak (Fig. 64) (voir plus haut) [12, 56].

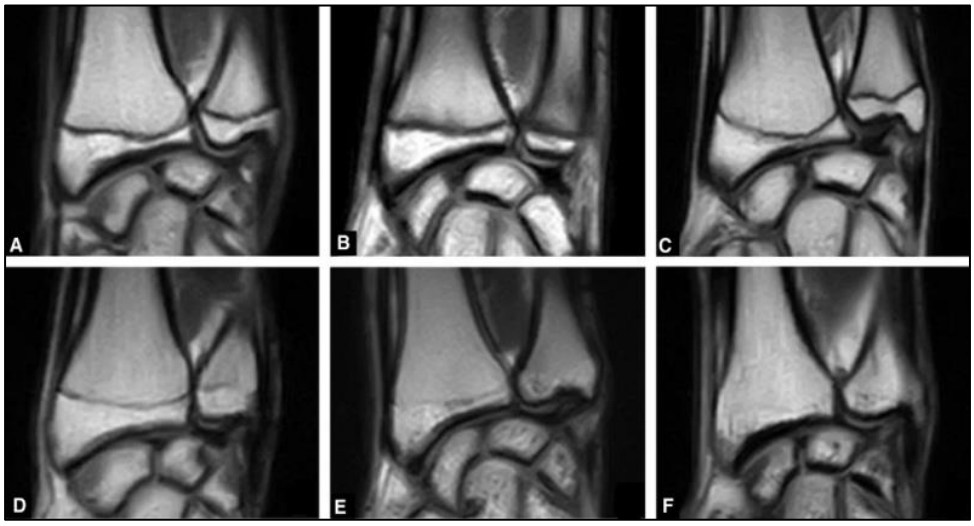


Figure 64 : Les 6 stades de fusion de la physe radiale distale gauche en IRM, selon Dvorak [12]

- La décision : sur la base des informations recueillies et comparées, une décision importante sera prise concernant les participants des compétions U-17 : la fusion complète du cartilage de croissance à l'IRM (stade VI) confirme avec une certitude de 99 % que le sujet est âgé de plus de 17 ans. Ceci est un critère formel d'élimination pour la sélection FIFA U-17 [12].

Remarques :

- Chez le sujet de sexe masculin, plusieurs études réalisées dans le cadre des compétitions internationales orchestrées par la FIFA ont démontré une bonne corrélation entre l'AR et l'AO du poignet en IRM toutes populations ethniques confondues [12] ;
- Chez le sujet de sexe féminin, l'IRM n'est pas recommandée pour la détermination de l'AO en raison d'une maturation osseuse plus rapide. En effet, Tscholl et al. retrouvent une proportion non négligeable de fusion

complète du cartilage de croissance de l'épiphyse distale du radius gauche (stade VI) chez des joueuses dès l'âge de 15 ans [12].

- La maturation osseuse est plus rapide chez les sujets de sexe féminin que chez les sujets de sexe masculin. Cette maturation osseuse plus précoce chez le sujet féminin est démontrée par le centre d'évaluation et de recherche médicale de la FIFA qui a réalisé des études chez le sujet de sexe féminin pour évaluer l'évolution de la physe radiale au poignet. Cette différence avait motivé la réalisation d'un atlas spécifiquement pour le genre féminin. C'est cet atlas qui est utilisé dans les compétitions internationales de la FIFA, féminines comme masculines, pour la catégorie des moins de 17 ans [56] ;
- Dans le futur, l'imagerie alternative telle que l'IRM de l'articulation sternoclaviculaire pourrait être envisagée pour l'estimation de l'âge des joueuses de moins de 17 ans car c'est l'os qui termine sa maturation en dernier [12].

Au total :

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 des difficultés d'accessibilité et de coût. 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. L'interprétation des images est facile, sous réserve qu'une classification simple de la fusion métaphyso-épiphysaire ait été choisie [126].

L'IRM du poignet permet d'analyser la croissance et la maturation osseuse et de déterminer l'âge biologique des footballeurs des compétitions des moins de 17 ans. Cette méthode d'imagerie d'évaluation de la maturation osseuse, basée sur l'analyse du radius uniquement, exactement sa physe distale gauche, est devenue la technique de référence servant de « gold standard » lors du choix des adolescents devant représenter leurs pays lors des compétitions internationales de football dans la catégorie des U-17 [56].

5. LA SCINTIGRAPHIE OSSEUSE :

La scintigraphie osseuse est l'une des applications de la Médecine nucléaire.

Le champ de la recherche en médecine nucléaire a commencé en 1946 lorsque de l'iode radioactif a été administré en « cocktail atomique » pour le traitement du cancer de la thyroïde. Depuis cette époque, la « médecine nucléaire » a évolué ; elle a été reconnue comme spécialité médicale par l'American Medical Association en 1971 [149].

La scintigraphie osseuse utilise des substances radiopharmaceutiques (traceurs), qui sont des médicaments qui seront marqués par des nucléides radioactifs (marqueurs). Ces substances sont administrées aux patients par injection intraveineuse, puis seront détectées et converties en images grâce à des équipements spécialisés, les gamma-caméras. Le traceur utilisé en scintigraphie osseuse est le méthylène-diphosphonate

(MDP), celui-ci est lié à un marqueur, le technétium-99 métastable (Tc-99m), qui est le principal radio-isotope utilisé en médecine nucléaire. Le complexe se fixe à l'os et émette des radiations, un rayon gamma (g), qui seront captées, mesurées et traduites en créant une image [50, 149].

En cas de modification physiologique, ou pathologique, au niveau de l'os, l'activité osseuse sera augmentée, avec par conséquent une accumulation du traceur dans cette région comparativement à l'os normal. Cela entraînera un point d'hyperfixation focalisé de la substance radiopharmaceutique sur une coupe osseuse [149].

a. La scintigraphie osseuse et le cartilage de croissance :

La scintigraphie osseuse au technétium 99m explore de façon fine l'activité du cartilage de croissance : l'isotope fixe les ostéoblastes et permet une exploration fine de l'activité du cartilage de croissance [87].

Elle permet notamment, en cas d'altération de cartilage de croissance sous la forme d'une épiphysiodèse, de connaître la valeur fonctionnelle du cartilage de croissance restant (Figure 65). Cet examen prend toute sa valeur dans le bilan d'une épiphysiodèse post-traumatique afin de savoir s'il persiste suffisamment de cartilage restant pour tenter une désépiphysiodèse [87].

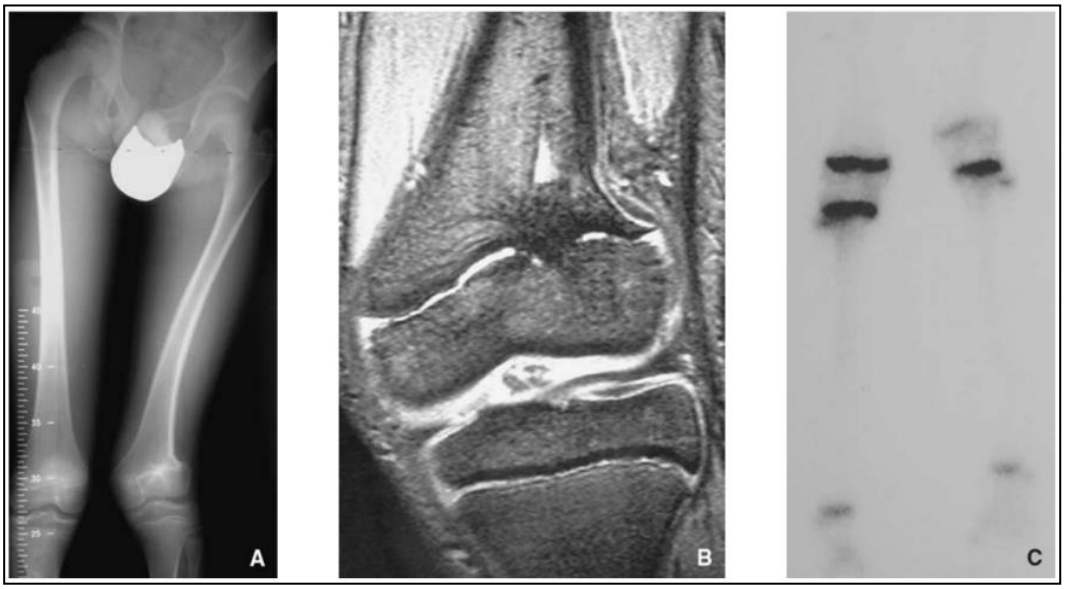


Figure 65 : Aspect d'un pont d'épiphysiodèse paracentral fémoral distal et ses conséquences. (A) il entraine un raccourcissement et un défaut d'axe en valgus. (B) Il est bien visible en IRM ainsi que l'aspect du cartilage de croissance restant. (C) La scintigraphie osseuse donne un aspect fonctionnel du cartilage de croissance restant, péjoratif par rapport à l'aspect IRM [87]

Certaines équipes parviennent à effectuer des tomoscintigraphies pour mieux visualiser le pont d'épiphysiodèse dans le cadre d'un bilan préopératoire [87].

b. La scintigraphie osseuse et l'évaluation de la maturation osseuse :

La scintigraphie osseuse, en matière d'évaluation de la maturation squelettique, est non applicable et trop irradiante [67], et les données décrites ne sont généralement pas utilisées à des fins cliniques, sauf lorsque la viabilité d'un cartilage de croissance

est douteuse [76]. En effet, peu de d'études qui ont travaillé sur ce type d'imagerie médicale sur enfants ou adolescents à la recherche d'un « âge osseux », citons : l'étude de Guillet et coll. [67].

Les auteurs de cette étude affirment que la méthode d'évaluation radio-isotopique de la croissance et de la maturation est complémentaire de la biométrie réalisée par les radiographies, elle lui apporte une dimension métabolique et fonctionnelle [67] : « L'analyse fonctionnelle avec le 99mTc MDP est un complément utile à l'investigation radiologique de la croissance et de la maturation du squelette » [76]. Ceci est possible : le traceur du méthylène diphosphonate (MDP) marqué au Technétium 99 métastable, se fixe au niveau des cartilages de croissance où se situe une intense vascularisation, puisque l'augmentation de l'apport sanguin et certains processus métaboliques et physiques revêtent une importance particulière dans les centres de croissance épiphysaires et qui seront mis en évidence par l'absorption de complexe MDP-99mTc [76].

Les scintigraphies osseuses faites chez les enfants et les jeunes adultes montrent une absorption accrue des radionucléides dans les cartilages de croissance épiphysaires. Les modifications liées à l'âge dans l'absorption épiphysaire du 99mTc MDP peuvent être utilisées pour déterminer un « âge osseux fonctionnel ». La numérisation a été réalisée avec une caméra à scintillation gamma, qui fournit des études rapides et à haute résolution [76]. Les petits os (mains, poignets, pieds et chevilles) n'ont pas été évalués en raison de la mauvaise résolution du système collimateur-caméra parallèle [76]. Selon cette étude (Tab. 14) :

Tableau 14 : Activité mesurée du Tc 99m pendant la croissance, d'après Guillet et coll. [67]

TABLEAU I. — **Evolution scintigraphique des cartilages de croissance sur les documents obtenus « en routine »**

Tranches d'âge (effectif)	**Cartilages de croissance**
21 jours à 1,9 ans (15 enfants)	extrémités proximales et distales : humérus, radius, cubitus, fémur, tibia, calcanéum (?).
2 ans à 5,9 ans (24 enfants)	entre 2 et 4 ans : péroné (proximal), grand trochanter. 4 ans : pointe de l'omoplate et région du cotyle. 5 ans : apophyse coracoïde, péroné (distal).
6 ans à 15,9 ans (71 enfants)	Pas de différence notable
16 ans à 21 ans (50 patients)	Disparition progressive de l'hyperactivité des cartilages de croissance.

- Tous les foyers de croissance sont bien visibles et hypercaptants dès la période néonatale et de façon symétrique, avec un paroxysme vers 5 ans [67] ; en fait, au cours des cinq premières années de vie, presque toutes les principales plaques de croissance épiphysaires étaient visibles

symétriquement sur les examens de routine. Dans six cas, les plaques de croissance étaient visibles avant que les foyers d'ossification épiphysaire correspondants ne deviennent apparents sur les radiographies [76] ;

- Une lente diminution de l'activité des cartilages de croissance épiphysaires a été démontrée chez les sujets de plus de seize ans. Dans certains cas, cette diminution s'est produite seulement après que la fermeture épiphysaire soit devenue visible sur les radiographies [76] :
    - Entre 15 et 18 ans, une diminution progressive de la fixation est objectivée par les caméras à scintillation [67] ;
    - Entre 18 et 21 ans, l'hyperactivité est moins bien délimitée [67].

Bien que cette méthode soit intéressante, des critiques limitent son utilisation [67] :

- Alors que la captation est présente dès la période néonatale, sa disparition entre 16 et 21 ans est trop progressive pour pouvoir assigner avec exactitude un âge durant cette période ;
- Selon le protocole proposé, l'irradiation subie par le patient et déclarée par les auteurs est d'environ 5,8 mCi/m^2 de surface corporelle (mCi = millicurie), ce qui représente, après calcul, une Dose Efficace de 1,25 mSv (millisievert) équivalent à une exposition d'environ 120 jours d'irradiation naturelle à Genève ou à environ 40 radiographies panoramiques dentaires OPT par m^2 de surface corporelle !

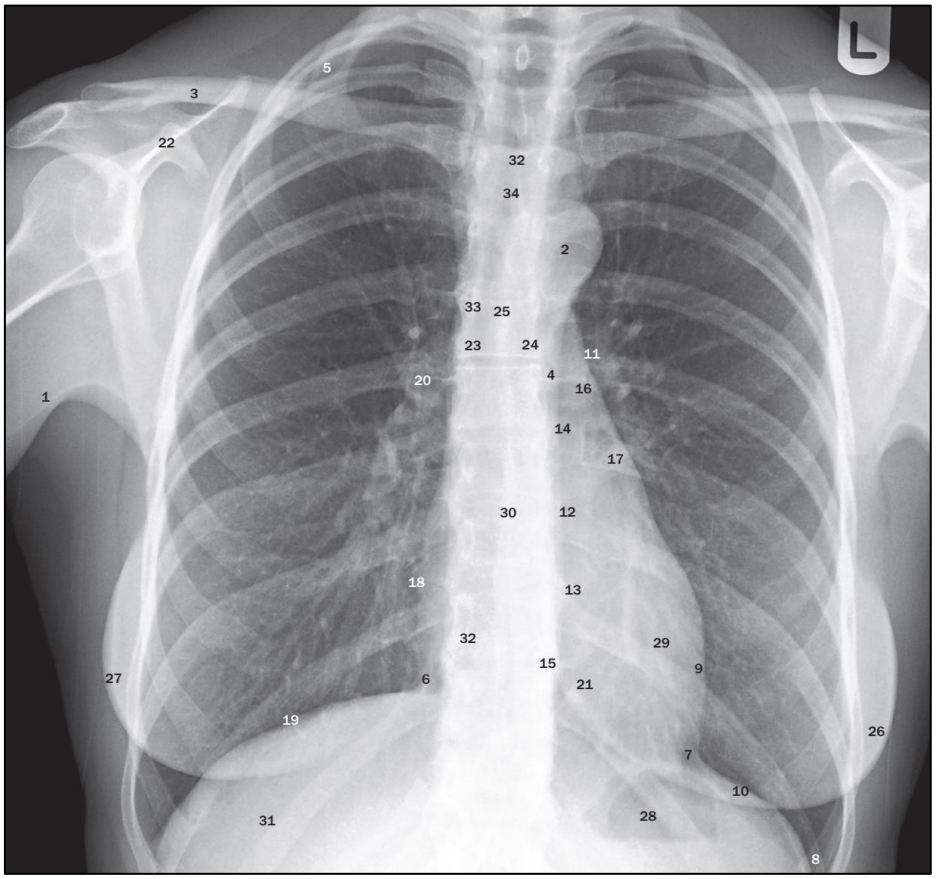
6. CONCLUSION :

Dans le cadre d'étude du développement des enfants et des adolescents, il apparait nécessaire de coupler la connaissance de l'AC avec l'étude de la taille et de la maturation osseuse grâce aux radiographies : c'est la méthode « auxo-radiographique ». Cette méthode n'est d'application clinique quotidienne que parce que la transparence du squelette en voie de développement est différente pour les cartilages de conjugaison et pour l'os partiellement transparent aux rayons X, d'où les nuances à la lecture des images [139]. Le langage « auxo-radiologique » est à sens unique : le sujet seul parle par l'intermédiaire de son imagerie squelettique, magie de l'irradiation X connue depuis quatre-vingt-quatre ans seulement (en 1895) : il s'agit donc bien d'une écriture dans l'espace et dans le temps, infra-verbale dans son expression, supra-verbale dans son interprétation. Ce que l'infant ne possède pas encore, déjà son squelette, et mieux encore son cartilage dès la période embryonnaire. Même le plus buté des adolescents ne peut cacher son degré de maturation squelettique et bien des immaturités sont des immaturations encore somatiques. Enfin, l'on sait désormais que des affections de l'adulte ont leurs stigmates inscrits dans leurs os, dans l'histoire de leur constitution [137]. Enfin, et au fur et à mesure des développements des techniques d'imagerie, les indicateurs les plus contributifs ont été analysés à partir de radiographies, puis de scanners et par IRM. L'avancée de la fusion métaphyso-épiphysaire peut être cotée dans une classification par stades permettant d'obtenir des classes d'âges, qui pourront trouver leur intérêt [126].

II.3. Anatomie radiologique des structures ostéo-articulaires des membres et leurs aspects évolutifs en postnatal :

1. La clavicule :

La clavicule est étudiée sur un téléthorax de face. Les ombres claviculaires traversent les ombres pulmonaires dans la partie apicale [10].



1 Pli axillaire antérieur	**10** Coupole gauche du diaphragme
2 Arc aortique	**11** Artère pulmonaire gauche
3 Clavicule	**12** Position de la valve aortique
4 Aorte descendante	**13** Position de la valve mitrale
5 1re côte	**14** Position de la valve pulmonaire
6 Veine cave inférieure	**15** Position de la valve tricuspide
7 Angle cardiophrénique gauche	**16** Tronc pulmonaire
8 Angle costophrénique gauche	**17** Région de l'apex de l'auricule de l'atrium gauche
9 Bord du ventricule gauche	

18 Bord de l'atrium droit	**27** Contour du sein droit
19 Coupole droite du diaphragme	**28** Gaz dans le fundus gastrique
20 Artère pulmonaire droite	**29** Position du ventricule gauche
21 Ventricule droit	**30** Position de l'atrium gauche
22 Épine de la scapula	**31** Position du foie
23 Bronche principale droite	**32** Manubrium sternal
24 Bronche principale gauche	**33** Veine cave supérieure
25 Carina (bifurcation de la trachée)	**34** Trachée
26 Contour du sein gauche	

Figure 66 : Radiographie du thorax. Adulte, Face [149]

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale :

Le centre d'ossification secondaire de la clavicule est épiphysaire médial, son ombre apparaît dans l'extrémité sternale de l'os [19, 91, 112, 125].

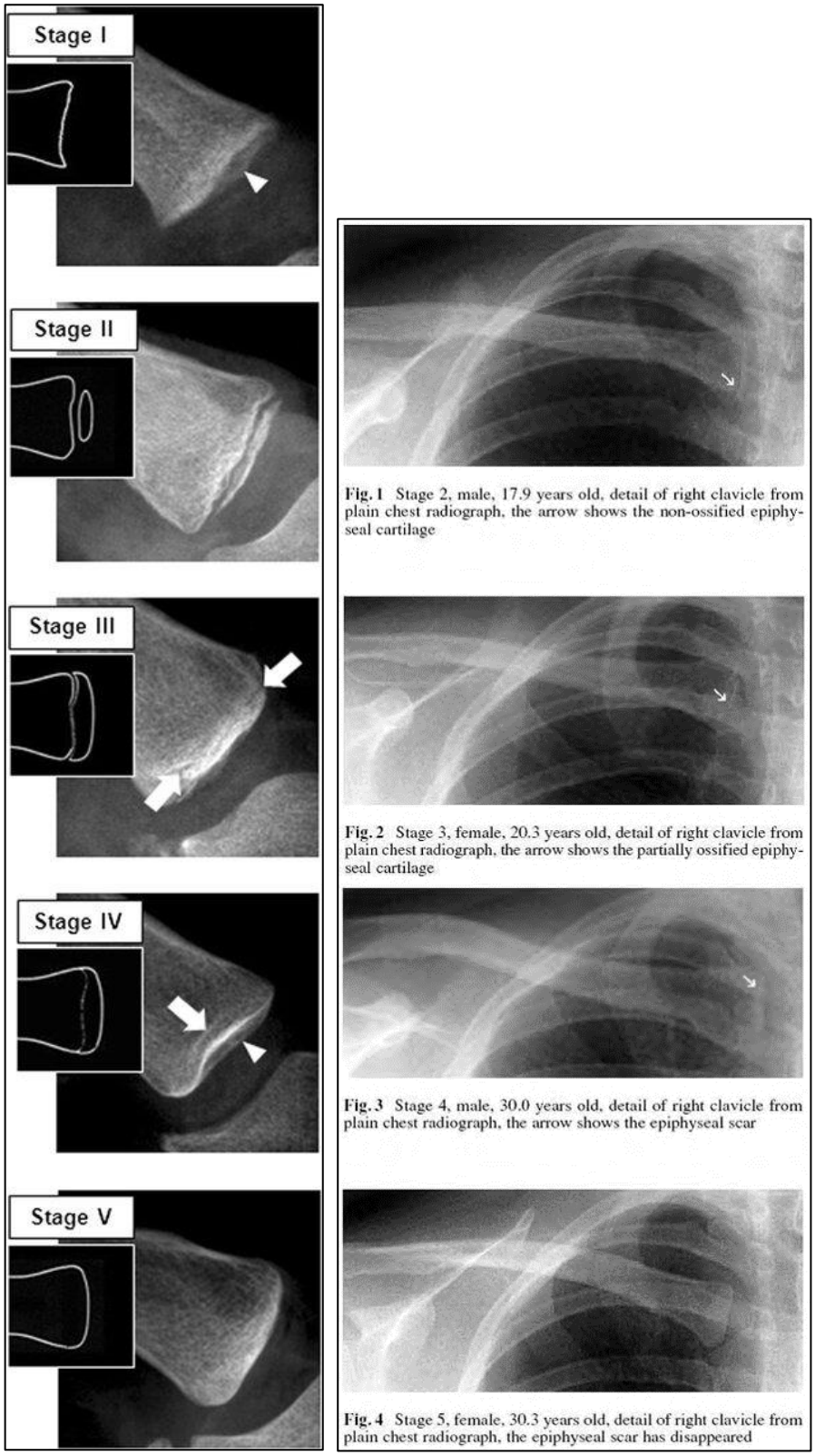


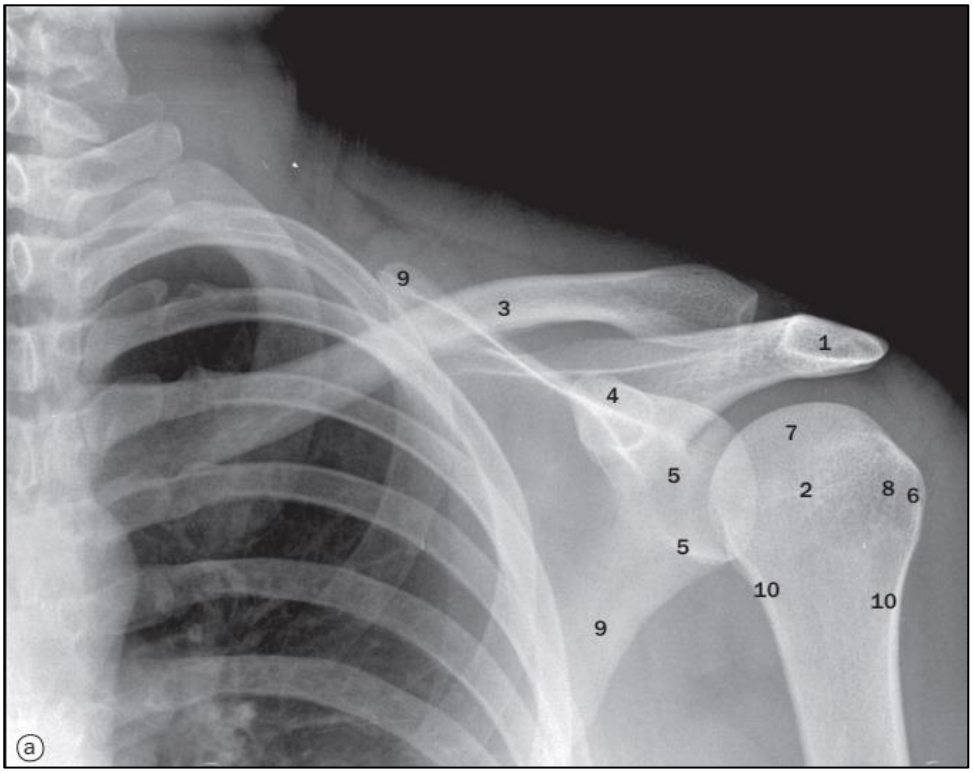
Figure 67 : Radiographie de la clavicule en croissance. Les cinq stades de maturation de l'extrémité sternale [67, 152]

Ce point dans le squelette est le dernier à apparaître [112], à 18 ans chez la fille et à 20 ans chez le garçon [91] ; et cette extrémité médiale est la dernière à se souder avec le corps de la clavicule [112], entre 22 et 25 ans [19, 91, 125].

2. L'épaule :

L'articulation de l'épaule est étudiée sur une radiographie de face (antéro-postérieure). Cette dernière permet d'étudier l'épiphyse proximale de l'humérus et les structures proches de la scapula [10].

Sont bien visibles les structures anatomiques suivantes : la tête humérale, la cavité glénoïdale, l'acromion, le processus coracoïde et une partie du bord latéral de la scapula [10].



1 Acromion de la scapula
2 Col anatomique de l'humérus
3 Clavicule
4 Processus coracoïde de la scapula
5 Cavité glénoïdale de la scapula
6 Tubercule majeur de l'humérus
7 Tête de l'humérus
8 Tubercule mineur de l'humérus
9 Scapula
10 Col chirurgical de l'humérus

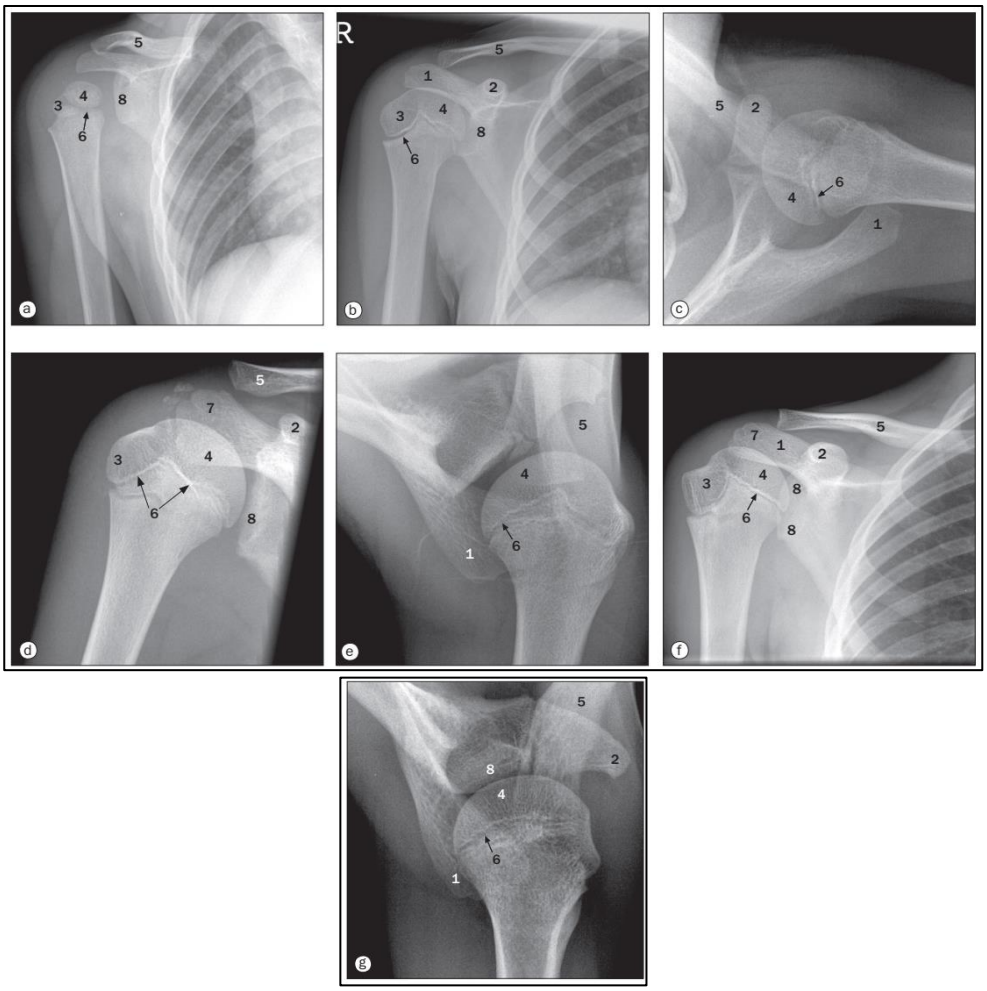
Figure 68 : Radiographie de l'épaule gauche. Adulte, Face [149]

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale :

- Pour l'épiphyse proximale de l'humérus :

- Chez le nouveau-né en post-terme, le point de la tête humérale est souvent visible radiologiquement [124], puisque la tête de l'humérus commencerait à s'ossifier au moment de la naissance, à terme [135]. Il peut apparaitre plus tard entre 3 et 6 mois [91] ;
  - L'ombre du point du tubercule majeur apparaît à 6 mois chez la fille et à un an chez le garçon, et celui du tubercule mineur à 3 ans [69] ;
  - Ces deux points précédents ne tardent pas à se souder l'un à l'autre au niveau du sillon intertuberculaire [112] ;
  - Vers l'âge de 4 à 5 ans, les deux points tuberculaires fusionnent avec le point céphalique pour former une épiphyse unique [69, 112] ;
  - L'épiphyse unique, formée par les trois points d'ossification, se trouve séparée de la diaphyse par un cartilage de conjugaison ; les radiographies avant l'âge de 16-17 ans montrent une épiphyse humérale non fusionnée [10] ;
  - Cette épiphyse se soude à la diaphyse vers 20 à 22 ans chez la fille et 21 à 25 ans chez le garçon [91].

- Pour la scapula :
  - Le processus coracoïde, se développe par deux points : le premier est principal [112], se trouve au centre du processus coracoïde [69, 91], son ombre radiologique apparaît au cours de la première année de la vie [25, 69, 112, 120], parfois à la naissance [69, 112]. Le deuxième est accessoire, se trouve à la base du processus coracoïde, apparaît à 14-15 ans [69, 91, 112]. Le processus coracoïde se soude au corps de la scapula : à 15 ans chez la fille et à 17-18 ans chez le garçon [19, 91, 125].
  - L'acromion, se développe par un point dont son ombre apparaît entre 14 et 18 ans [25, 91, 112, 120]. Il se soude au corps de la scapula entre 17 et 20 ans [19, 91, 112, 125].
  - La cavité glénoïdale, se développe par deux points visibles radiologiquement. Le premier, glénoïdien supérieur, survient entre 10 et 12 ans ; le deuxième, glénoïdien inférieur, apparaît entre 16 et 18 ans. Ces points se soudent au corps de la scapula : entre 16 et 18 ans pour le 1^{ier} point ; et entre 19 et 20 ans pour le 2ème point [91, 112].



1 Acromion de la scapula
2 Noyau d'ossification du processus coracoïde
3 Noyau d'ossification du tubercule majeur de l'humérus
4 Noyau d'ossification de la tête de l'humérus
5 Clavicule
6 Ligne épiphysaire
7 Noyau d'ossification de l'acromion
8 Cavité glénoïdale de la scapula

Figure 69 : Radiographie de l'épaule en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 1 an, (b) et (c) enfant de 6 ans, (d) et (e) enfant de 12 ans, (f) et (g) enfant de 14 ans [149]

3. Le coude

L'articulation du coude est étudiée sur deux incidences radiologiques, de face et de profil (latérale). Ces dernières permettent d'étudier l'épiphyse distale de l'humérus et les épiphyses proximales du radius et de l'ulna [10].

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale :

Sept indicateurs vont se trouver visibles, mais, fait essentiel, tous les sept ne seront perceptibles ensemble qu'au moment de l'adolescence qu'ils serviront à définir. Auparavant, les volumes cartilagineux, n'arrêtant pas le rayonnement X, seront invisibles mais n'en permettront pas moins tous les mouvements de cette prodigieuse triple articulation [132].

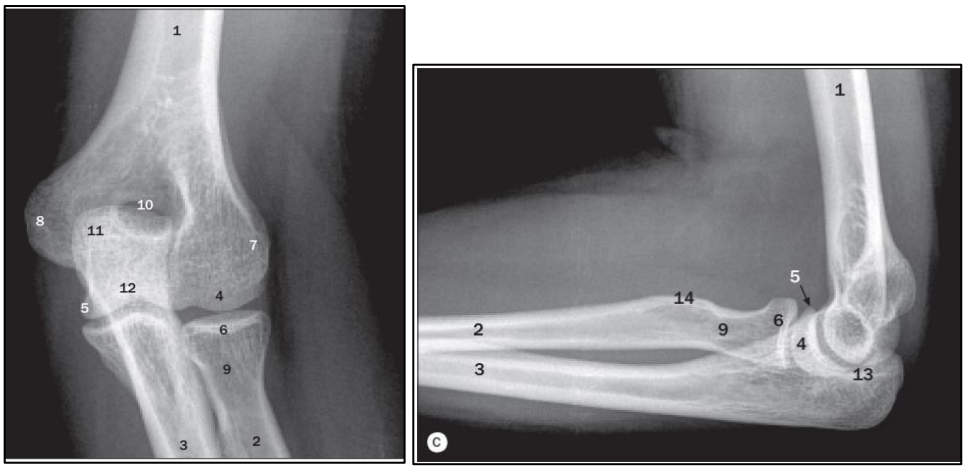


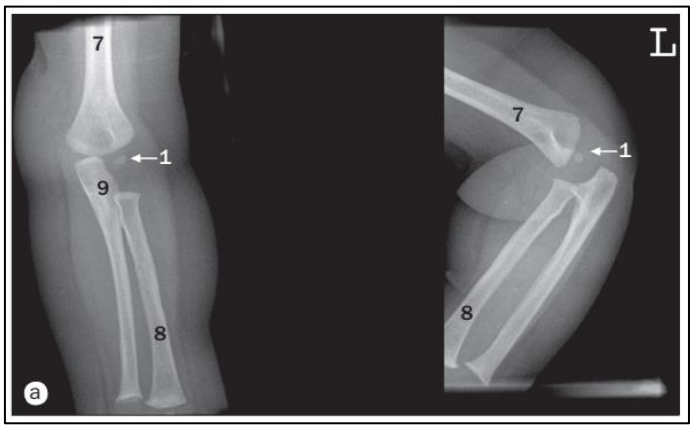
Figure 70 : Radiographie du coude. Adulte, Face et Profil [149]

En effet, à la naissance, aucun point d'ossification secondaire n'est visible. Leur apparition s'échelonne jusqu'à la puberté [124] :

- Le point du capitulum, apparaît vers 1 an ;
- Le point trochléen s'ossifie entre 7 et 9 ans ;
- Le point épicondylien médial est retrouvé entre 4 et 6 ans ;
- Le point épicondylien latéral apparaît vers 11-12 ans ;
- Le point olécrânien est retrouvé entre 8 et 11 ans ;
- L'épiphyse proximale du radius apparaît entre 3 et 5 ans.

A noter que le noyau épicondylien latéral fusionne avec le capitulum avant de se souder à l'humérus vers 12 ans [124].

Le centre d'ossification de l'épicondyle médial fusionne séparément avec la diaphyse à la 20ème année. Il n'obéit pas à la loi de l'ossification qui, lorsqu'il existe plusieurs centres secondaires, ils fusionnent entre eux pour former une seule épiphyse qui fusionne avec la diaphyse [10].





1 Noyau d'ossification du capitulum
2 Noyau d'ossification de l'épicondyle latéral
3 Noyau d'ossification de l'épicondyle médial
4 Noyau d'ossification de la tête radiale
5 Noyau d'ossification de la trochlée
6 Ligne épiphysaire
7 Humérus
8 Radius
9 Ulna
10 Noyau d'ossification de l'olécrâne

Figure 71 : Radiographie du coude en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 7 mois, (b) enfant de 3 ans, (c) enfant de 6 ans, (d) enfant de 9 ans [149]

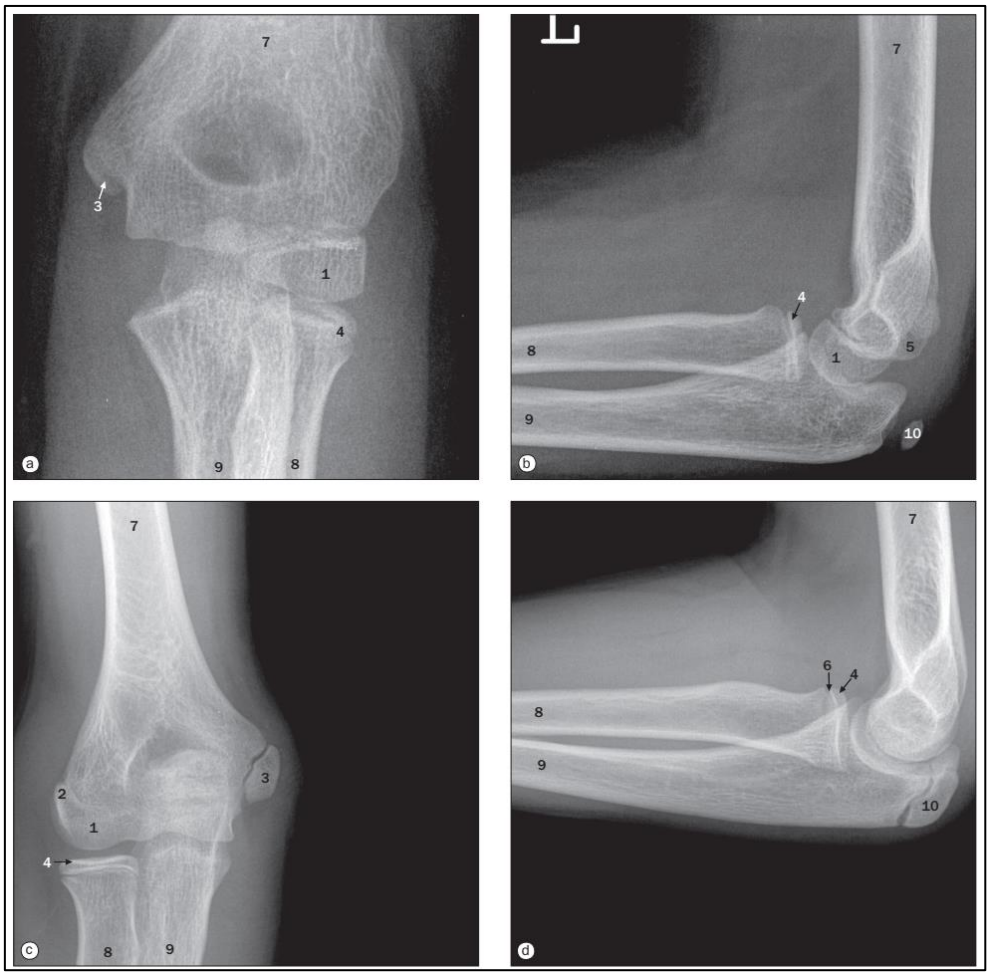
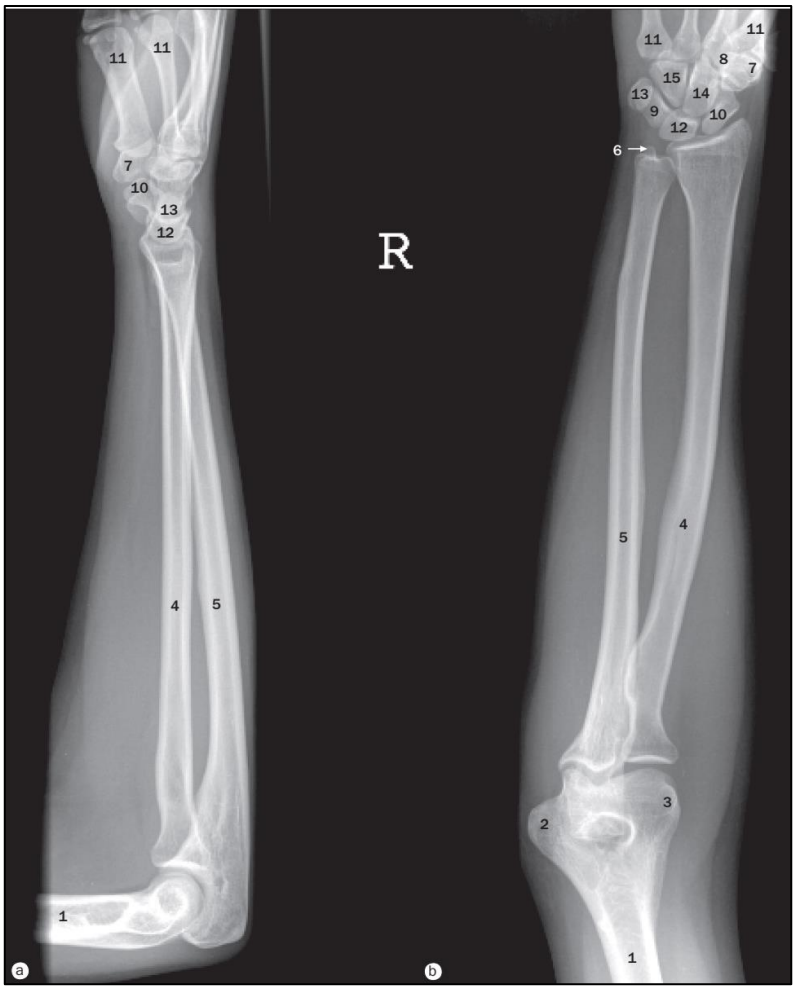


Figure 72 : Radiographie du coude en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) et (b) enfant de 11 ans, (c) et (d) enfant de 14 ans [149]

4. Le poignet et la main :

L'articulation du poignet et la main sont étudiées sur deux incidences radiologiques, face et profil. Ce qui va permettre d'étudier les épiphyses distales du radius et de l'ulna, les os du carpe, les métacarpiens et les phalanges [10].

Le sujet de la main est un des plus difficiles à étudier, pour une raison fort simple : la main comprend beaucoup de petits os et de petites articulations [112]



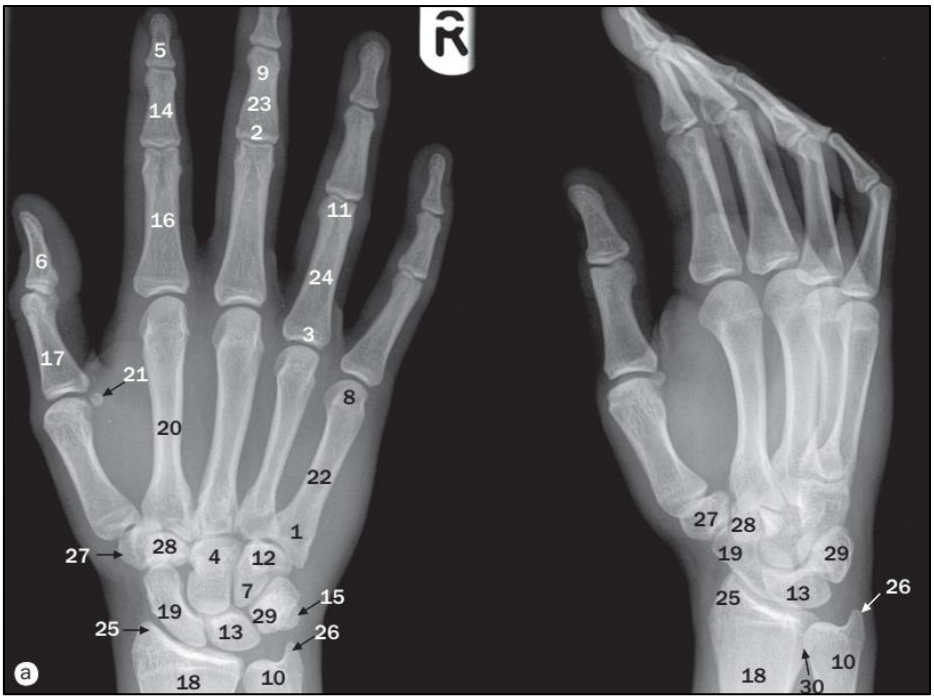
1 Humérus	**6** Processus styloïde de l'ulna	**11** Métacarpiens
2 Épicondyle médial de l'humérus	**7** Os trapèze	**12** Os lunatum
3 Épicondyle latéral de l'humérus	**8** Os trapézoïde	**13** Os pisiforme
4 Radius	**9** Os triquetrum	**14** Os capitatum
5 Ulna	**10** Os scaphoïde	**15** Os hamatum

Figure 73 : Radiographie de l'avant-bras et du poignet. Adulte, Face et Profil [149]

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale :

L'ensemble des os du carpe est absent à la naissance, de même, les noyaux d'ossification secondaire des phalanges et des os de l'avant-bras apparaissent au cours de la croissance [124]. L'ossification de cette région se fait comme suit [10] :

- Pour le radius et l'ulna : le premier centre secondaire apparaît pour l'épiphyse distale du radius à la 1ère année, suivi du centre de l'épiphyse distale de l'ulna à la 5ème année ;
- Pour les os du carpe : leur ossification se fait en spirale et les premiers os à s'ossifier sont le capitatum et l'hamatum. Le triquétrum, le lunatum, le scaphoïde, le trapèze, le trapézoïde se succèdent progressivement et le dernier os à s'ossifier est le pisiforme ;



1 Base du 5e métacarpien
2 Base de la phalange moyenne du majeur
3 Base de la phalange proximale de l'annulaire
4 Os capitatum
5 Phalange distale de l'index
6 Phalange distale du pouce
7 Os hamatum
8 Tête du 5e métacarpien
9 Tête de la phalange moyenne du majeur
10 Tête de l'ulna
11 Tête de la phalange proximale de l'annulaire
12 Crochet (hamulus) de l'hamatum
13 Os lunatum
14 Phalange moyenne de l'index
15 Os pisiforme
16 Phalange proximale de l'index
17 Phalange proximale du pouce
18 Radius
19 Os scaphoïde
20 2e métacarpien
21 Os sésamoïde
22 Diaphyse du 5e métacarpien
23 Diaphyse de la phalange moyenne du majeur
24 Diaphyse de la phalange proximale de l'annulaire
25 Processus styloïde du radius
26 Processus styloïde de l'ulna
27 Os trapèze
28 Os trapézoïde
29 Os triquetrum
30 Incisure ulnaire du radius
31 Base du métacarpien

Figure 74 : Radiographie du poignet et de la main. Adulte, Face et Profil [149]

- Pour les métacarpiens : les quatre médiaux s'ossifient avec un centre secondaire pour la tête, tandis que le premier métacarpien s'ossifie avec un centre secondaire pour la base. Les centres secondaires des métacarpiens apparaissent en 2ème année chez les filles et en 3ème année chez les garçons ;
- Pour les phalanges : elles s'ossifient avec un centre secondaire pour la base qui apparait dès la 3ème année après la naissance.

La fusion des épiphyses s'achève à la 15ème année chez la fille et à la 17ème année chez le garçon.

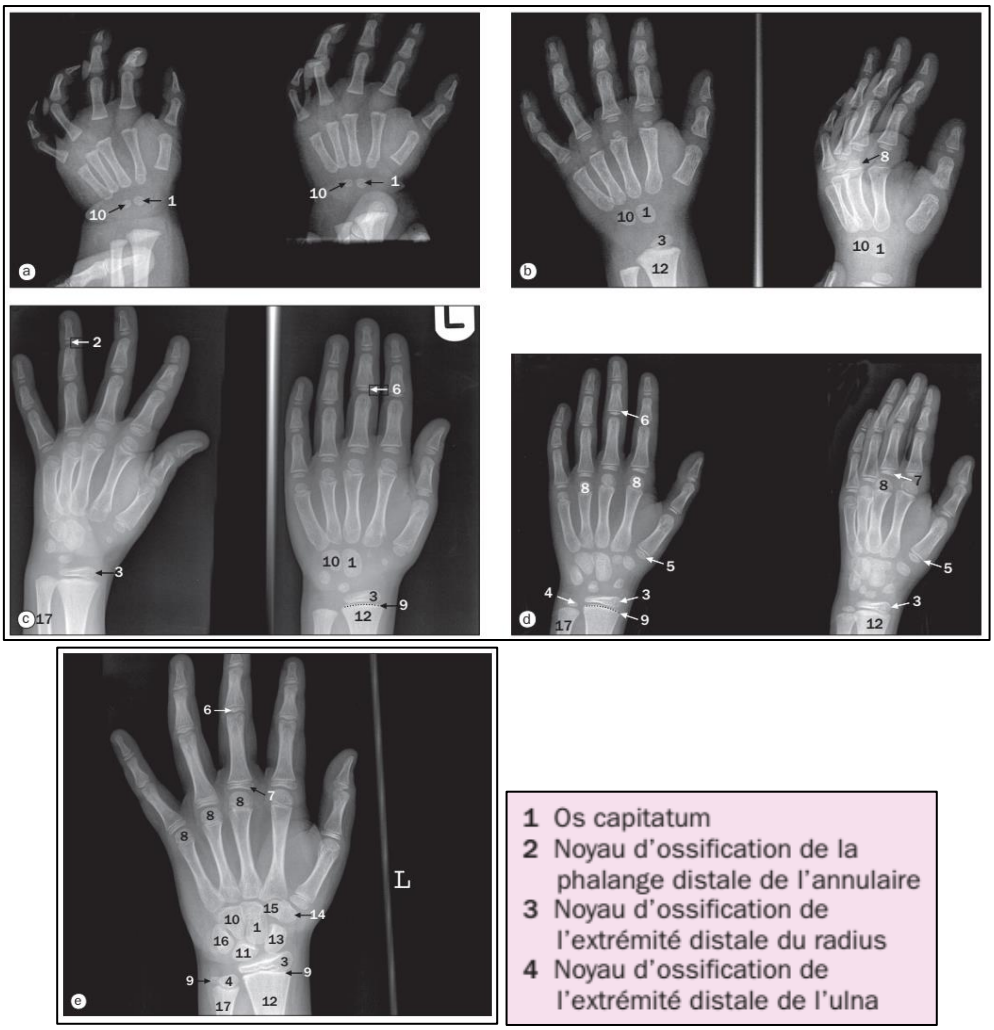


Figure 75 : Radiographie du poignet et de la main en croissance, plusieurs stades de maturation. (a) enfant de 10 mois, (b) enfant de 2 ans, (c) enfant de 6 ans, (d) enfant de 9 ans, (e) enfant de 11 ans [149]

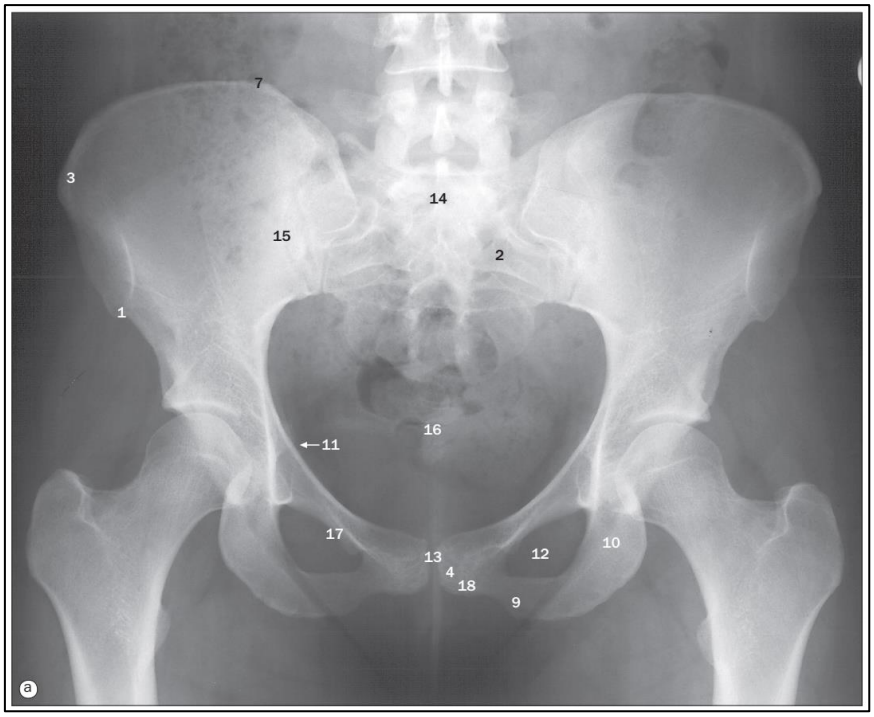
5. Le bassin, la crête iliaque et la hanche :

Le bassin et l'articulation de la hanche sont étudiés sur une radiographie de face. La position du membre pelvien doit permettre au fémur de tourner légèrement médialement : les membres pelviens doivent être écartés au niveau des talons et tous les orteils soient dirigés antéro-médialement. Dans cette position, les ombres de l'épiphyse proximale du fémur et de la région acétabulaire sont mieux visualisées [10].

Sur cette incidence, on aperçoit [10] :

- Les rebords de l'acétabulum et de la tête du fémur apparaissent sous forme de lignes courbes indiquant le tissu cortical radio-dense de l'os ;

- L'ombre du tissu cortical épais du bord médial de l'acétabulum peut être tracée au-dessus, qui devient continue avec l'ombre du bord pelvien et en dessous d'elle, elle se termine juste au-dessus et latéralement par rapport au bord du foramen obturateur ;
- L'espace articulaire de l'articulation de la hanche semble radiotransparent et a été mesuré entre 4 mm et 7 mm ;
- Les ombres du bord postérieur de l'acétabulum et de la fovéa capitis du fémur sont également visibles sur la radiographie ;
- Les ombres du col, du grand trochanter et du petit trochanter du fémur sont visualisées. En rotation médiale avec écartement des pieds, l'ombre du col du fémur est plus horizontale. En rotation latérale, l'ombre du petit trochanter devient proéminente.



1 Épine iliaque antéro-inférieure
2 Foramen sacral antérieur
3 Épine iliaque antérosupérieure
4 Corps du pubis
5 Noyau d'ossification de la crête iliaque
6 Noyau d'ossification de la tubérosité ischiatique
7 Crête iliaque
8 Ilium
9 Branche inférieure du pubis
10 Branche de l'ischium
11 Épine ischiatique
12 Foramen obturé
13 Symphyse pubienne
14 Crête sacrale
15 Articulation sacro-iliaque
16 Segment du coccyx
17 Branche supérieure du pubis
18 Tubercule du pubis

Figure 76 : Radiographie du bassin et des hanches. Adulte, Face [149]

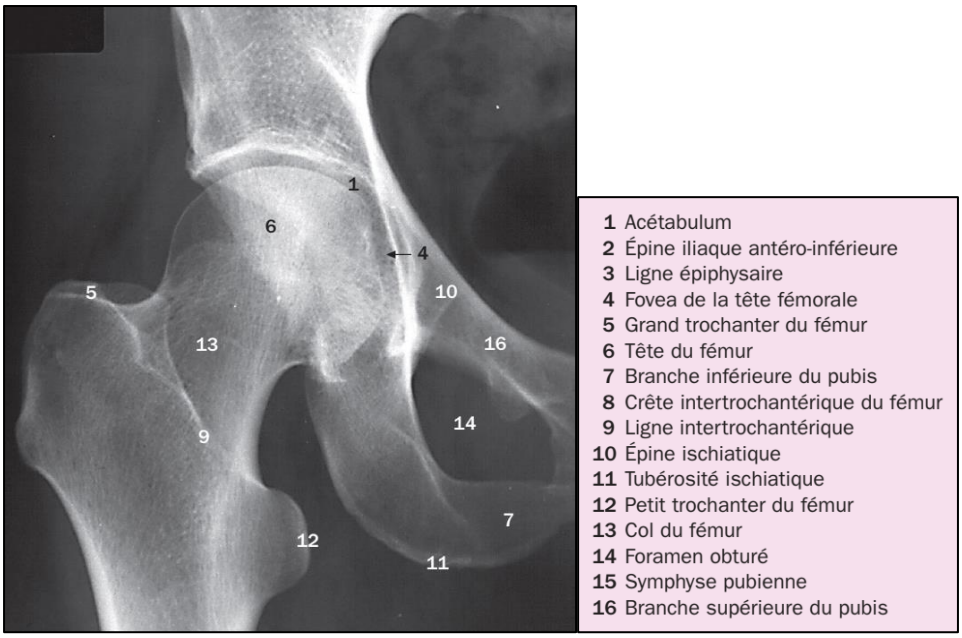


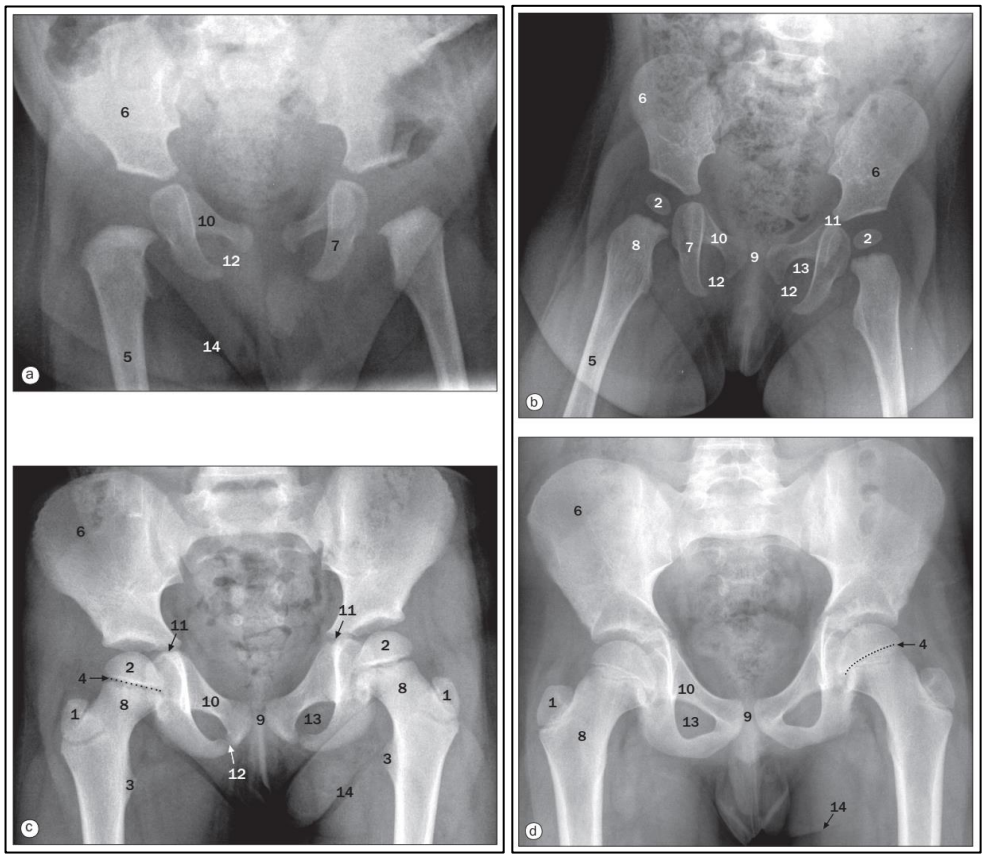
Figure 77 : Radiographie de la hanche. Adulte, Face [149]

- Deux lignes courbes peuvent être tracées (elles s'altèrent dans les fractures du col du fémur ou dans les luxations de la hanche) :
  - Ligne de Shenton ou cintre cervico-obturateur : relie le bord supérieur du foramen obturateur au bord inférieur du col du fémur, jusqu'à l'ombre du petit trochanter ;
  - Ligne reliant le bord latéral de l'ombre de l'ilion au du bord supérieur du col du fémur.
- L'angle cervico-diaphysaire peut être tracé et calculé (120°-135°).
- Les ombres de la structure trabéculaire qui supporte et dirige la pression sont présentent (elle évalue le degré de calcification de l'os).

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale [10, 124] :

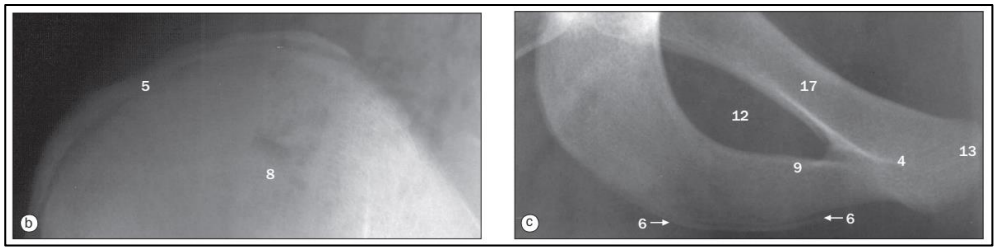
- A la naissance, les trois pièces osseuses constituant l'os coxal : ilion, ischion et pubis, apparaissent comme des os séparés reliés par l'intermédiaire d'une structure cartilagineuse radiotransparente, c'est le cartilage triradié, ou en Y, au niveau de l'acétabulum. L'épiphyse proximale du fémur est entièrement cartilagineuse et radiotransparente ;
- Après la naissance, le point d'ossification de la tête fémorale est visible dès la 1ère année de vie. Grand trochanter vers 4 ans et petit trochanter entre 9-10 ans et fusionnent à 16 ans. l'acétabulum se creuse, ils commencent à être radio-opaques Vers 3 à 6 mois ;
- La jonction entre la branche ischiatique et la branche inférieure du pubis présente un cartilage. La fusion des branches ischio-pubiennes a lieu après la naissance entre 7 et 8 ans ;

- L'épiphyse proximale du fémur se soude et le cartilage en Y disparaît, vers 17 et 19 ans. La fusion des crêtes iliaques est un repère permettant d'authentifier la fin de la croissance (test de Risser).



1 Noyau d'ossification du grand trochanter
2 Noyau d'ossification de la tête du fémur (épiphyse)
3 Noyau d'ossification du petit trochanter
4 Ligne épiphysaire
5 Fémur
6 Ilium
7 Ischium
8 Col du fémur
9 Symphyse pubienne
10 Pubis
11 Cartilage triradié
12 Jonction non ossifiée entre l'ischium et le pubis
13 Foramen obturé
14 Plis adipeux

Figure 78 : Radiographie du bassin et de la hanche en croissance, de Face. (a) fille de 4 mois, (b) fille de 9 mois, (c) fille de 6 ans, (d) fille de 11 ans [149]



1 Épine iliaque antéro-inférieure
2 Foramen sacral antérieur
3 Épine iliaque antérosupérieure
4 Corps du pubis
5 Noyau d'ossification de la crête iliaque
6 Noyau d'ossification de la tubérosité ischiatique
7 Crête iliaque
8 Ilium
9 Branche inférieure du pubis
10 Branche de l'ischium
11 Épine ischiatique
12 Foramen obturé
13 Symphyse pubienne
14 Crête sacrale
15 Articulation sacro-iliaque
16 Segment du coccyx
17 Branche supérieure du pubis
18 Tubercule du pubis

Figure 79 : Radiographie du bassin en croissance. 17 ans, Face [149]

6. Le genou :

L’articulation du genou est étudiée sur deux incidences radiologiques, de face et de profil [10].

Sur l’incidence Face [10] :

- Les rebords des os participant à l’articulation présentent une ligne radio-opaque, blanche et lisse, qui est due à la présence d'un tissu osseux cortical fin ;
- L'espace articulaire apparaît comme une zone radiotransparente, 3 à 5 mm de hauteur ;
- L’ombre patellaire est visible et superposée sur l'ombre de l'épiphyse distale du fémur ;
- Les ombres condyliennes médiale et latérale du fémur sont visibles de chaque côté de la partie inférieure de l'ombre patellaire ;
- Le bord latéral du condyle latéral du fémur présente un sillon qui représente le sillon du muscle poplité ;
- L’aire intercondylaire du tibia présente des ombres des tubercules intercondylaires entre les surfaces tibiales supérieures médiale et latérale ;
- L'ombre de l'épiphyse proximale de la fibula est visible près de la partie inférieure du condyle latéral du tibia.

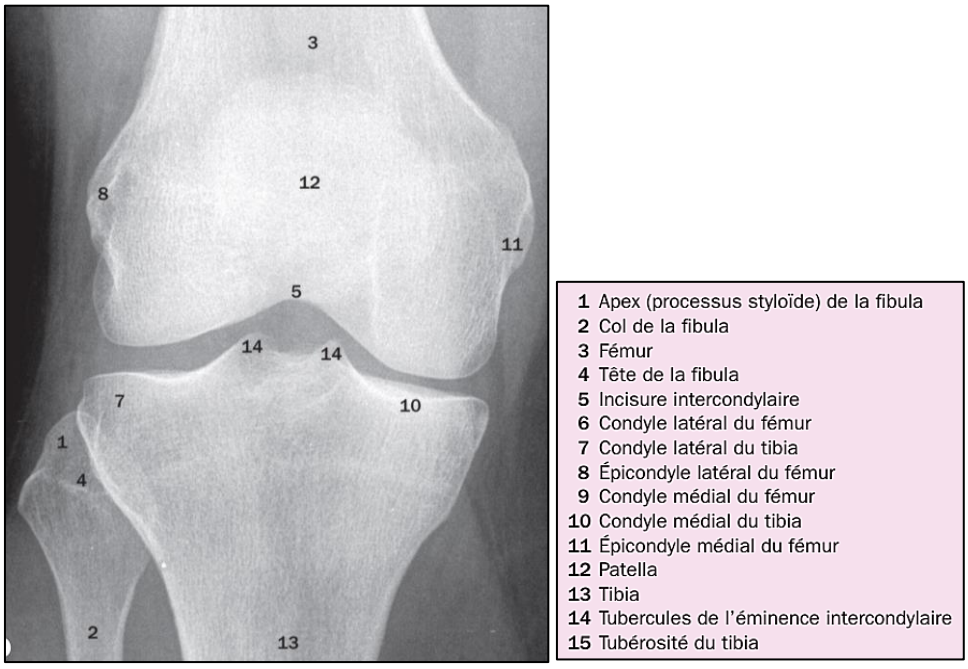
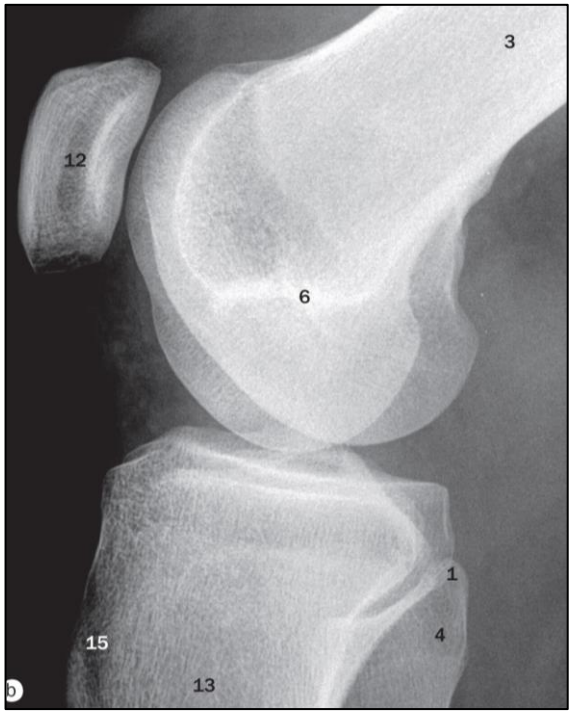


Figure 80 : Radiographie du genou. Adulte, Face [149]

Sur l’incidence Profil [10] :

- L'ombre patellaire est visible en avant de l'épiphyse distale du fémur ; sur un genou en flexion complète, l'ombre patellaire vient se trouver en position distale par rapport aux ombres condyliennes du fémur ;

- Les ombres des condyles, médial et latéral, du fémur se superposent, ainsi que et celles des condyles du tibia ; l'ombre de l'épiphyse proximale de la fibula et les ombres condyliennes du tibia sont également superposées ;
- Les ombres des diaphyses du tibia et de la fibula sont décalées, l'ombre de la diaphyse fibulaire apparaît en arrière de celle de la diaphyse tibiale ; ces ombres présentent des nuances de gris et de blanc, les ombres blanches représentent l'os compact. La partie spongieuse apparaît grisâtre et le canal médullaire est radiotransparent. En vue latérale de la jambe.



1 Apex (processus styloïde) de la fibula
2 Col de la fibula
3 Fémur
4 Tête de la fibula
5 Incisure intercondylaire
6 Condyle latéral du fémur
7 Condyle latéral du tibia
8 Épicondyle latéral du fémur
9 Condyle médial du fémur
10 Condyle médial du tibia
11 Épicondyle médial du fémur
12 Patella
13 Tibia
14 Tubercules de l'éminence intercondylaire
15 Tubérosité du tibia

Figure 81 : Radiographie du genou. Adulte, Profil [149]

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale [10, 124] :

- A la naissance, les ombres de l'épiphyse distale du fémur et de l'épiphyse proximale du tibia sont visibles, quelquefois elles sont présentes lors d'une grossesse à terme ;
- L'épiphyse proximale de la fibula est observée vers l'âge de 3 à 4 ans ;
- La patella, cartilagineuse à la naissance, s'ossifie plus tardivement à l'âge de 3-4 ans, à partir de multiples centres secondaires (aspect floconneux) qui fusionnent rapidement pour former une seule masse ;
- La tubérosité tibiale apparaît vers la puberté et fusionne avec l'épiphyse proximale du tibia, elle apparaît comme une projection en forme de langue dirigée vers le bas sur la face antérieure de l'épiphyse.



Figure 82 : Radiographie du genou en croissance, Face et Profil. (a) fille de 2 ans, (b) et (c) fille de 5 ans, (d) et (e) fille de 12 ans [149]

7. La cheville et le pied :

L'articulation de la cheville ainsi que le pied sont étudiés sur deux incidences radiologiques, de face (ou dorso-plantaire pour le pied) et de profil [10].

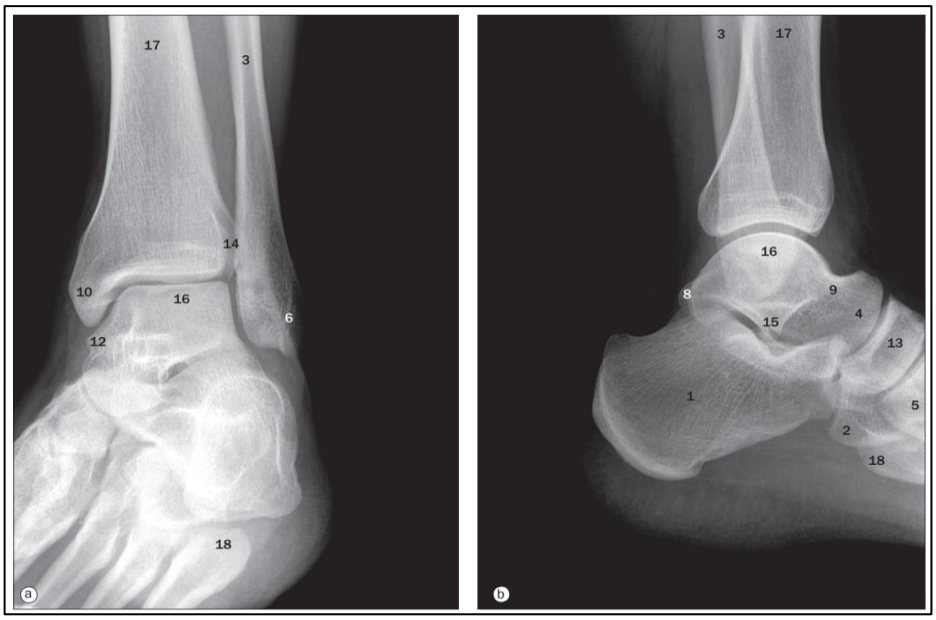
Sur l'incidence Face [10] **:**

- Les ombres des épiphyses distales du tibia et de la fibula, les ombres du talus, du calcanéus, du naviculaire, du cuboïde et des cunéiformes sont visibles ;

- L'articulation calcanéo-cuboïde et l'articulation talo-naviculaire peuvent être bien visibles ;
- L'ombre de l'articulation de la cheville avec les épiphyses distales du tibia et de la fibula, et l'extrémité supérieure du talus sont visibles ; la cavité articulaire apparaît radiotransparente ;
- L'ombre des malléoles, médiale et latérale, est visible ; l'ombre malléolaire latérale s'étend légèrement en bas par rapport à l'ombre malléolaire médiale ;
- Les ombres des métatarsiens et des phalanges sont aussi visibles ;
- Le cinquième os métatarsien présente une projection appelée tubérosité du 5ème métatarsien, aussi visible ;
- Des ombres d'os sésamoïdes sont visibles près de la surface plantaire de l'extrémité distale du premier os métatarsien.

Sur l'incidence Profil [10] **:**

- Les ombres des épiphyses distales du tibia et de la fibula sont superposées ;
- L'ombre de l'articulation subtalaire, ainsi que celle de l'articulation talocalcanéo-naviculaire sont clairement visible ;
- Les ombres du cuboïde chevauchant les ombres du cunéiforme sont visibles.



1 Calcanéus
2 Os cuboïde
3 Fibula
4 Tête du talus
5 Cunéiforme latéral
6 Malléole latérale de la fibula
7 Processus latéral du calcanéus
8 Tubercule latéral du talus
9 Col du talus
10 Malléole médiale du tibia
11 Processus médial du calcanéus
12 Tubercule médial du talus
13 Os naviculaire
14 Région de l'articulation tibiofibulaire inférieure
15 Sustentaculum tali du calcanéus
16 Talus
17 Tibia
18 Tubérosité de la base du 5e métatarsien

Figure 83 : Radiographie de la cheville. Adulte, Face et Profil [149]



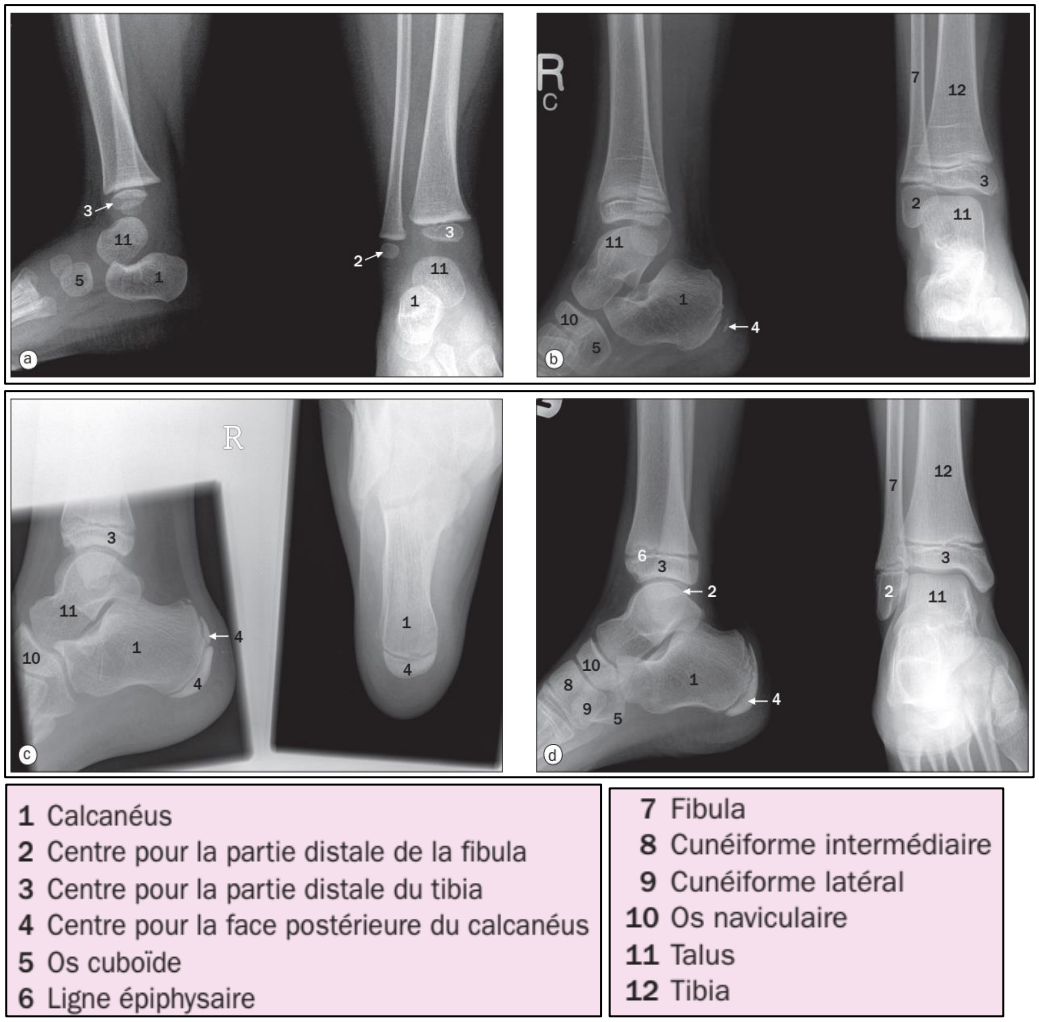
1 Os calcanéus
2 Os cuboïde
3 Phalange distale du 2e orteil
4 1er métatarsien
5 Cunéiforme intermédiaire
6 Cunéiforme latéral
7 Cunéiforme médial
8 Phalange moyenne du 2e orteil
9 Os naviculaire
10 Phalange proximale du 2e orteil
11 Os sésamoïdes dans le muscle court fléchisseur de l'hallux
12 Talus
13 Tubérosité de la base du 5e métatarsien
14 Os naviculaire

Figure 84 : Radiographie du pied. Adulte, Face et Profil [149]

Aspects évolutifs durant la croissance postnatale [10, 124] :

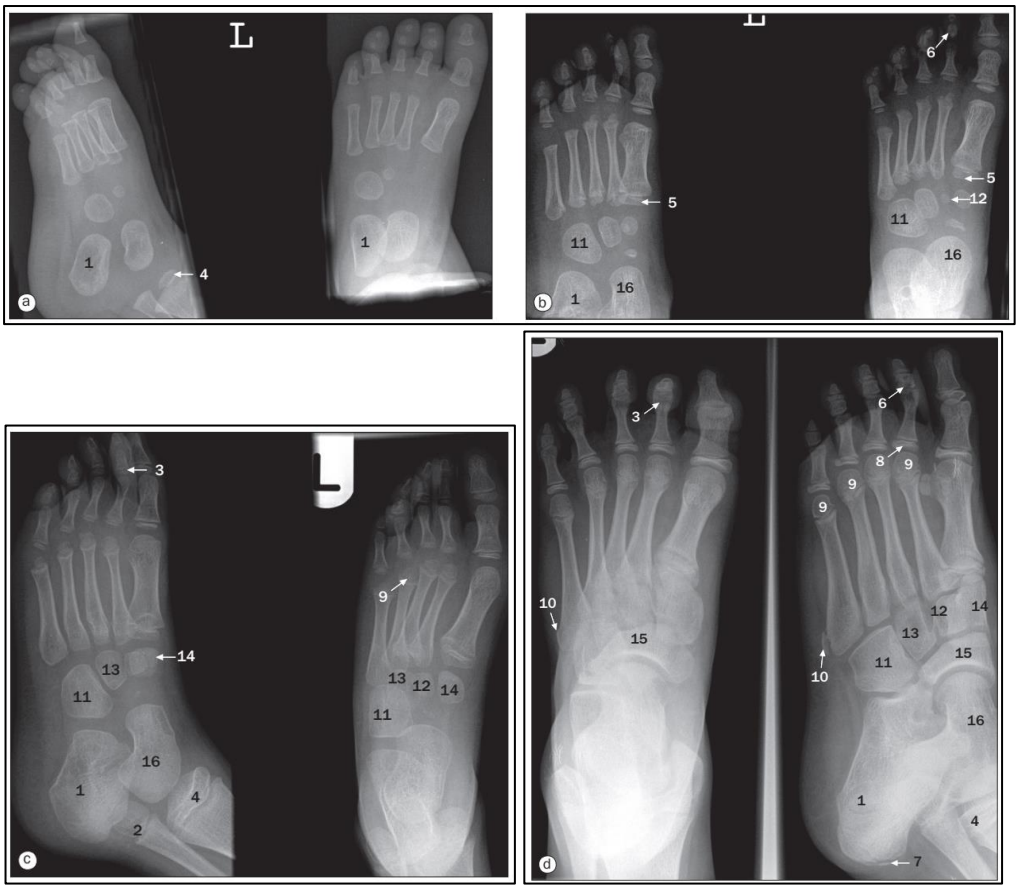
- Le noyau d'ossification secondaire tibial inférieur apparaît entre 2 et 7 mois ; le noyau fibulaire inférieur est visible à la 1ère année de vie ;
- Au niveau du tarse, les ombres des centres d'ossification du talus et du calcanéus sont visibles à la naissance ou apparaissent peu après celle-ci ;
- Le noyau d'ossification secondaire du calcanéus, qui forme la tubérosité du calcanéus, situé à la partie postérieure de celui-ci, apparaît entre 5 et 12 ans, la fusion ne pouvant être complète qu'à l'âge de 22 ans ;
- Le cuboïde peut être présent dès la naissance ou n'apparaître qu'au cours de la première année de vie ; pour les cunéiformes entre 3 et 4 ans, pour le naviculaire à la 4ème année ;

- L’ombre du corps des métatarsiens est visible à la naissance ; les noyaux d'ossifications secondaires épiphysaires des phalanges et métatarsiens apparaissent à l'âge de 3 ou 4 ans. La fusion complète de ces derniers est obtenue entre 12 et 22 ans ;
- La tubérosité du 5ème os métatarsien peut présenter un point d'ossification secondaire visible (qu'il faut différencier d'une fracture).



1 Calcanéus
2 Centre pour la partie distale de la fibula
3 Centre pour la partie distale du tibia
4 Centre pour la face postérieure du calcanéus
5 Os cuboïde
6 Ligne épiphysaire
7 Fibula
8 Cunéiforme intermédiaire
9 Cunéiforme latéral
10 Os naviculaire
11 Talus
12 Tibia

Figure 85 : Radiographie de la cheville en croissance, Face et Profil. (a) fille de 3 ans, (b) fille de 5 ans, (c) fille de 13 ans, (d) fille de 10 ans [149]



1 Calcanéus
2 Noyau d'ossification de la partie distale de la fibula
3 Noyau d'ossification de la phalange distale du 2e orteil
4 Noyau d'ossification de la partie distale du tibia
5 Noyau d'ossification du 1er métatarsien
6 Noyau d'ossification de la phalange moyenne du 2e orteil
7 Noyau d'ossification de la face postérieure du calcanéus
8 Noyau d'ossification de la phalange proximale du 2e orteil
9 Noyau d'ossification du 2e métatarsien (s'applique du 2e au 5e métatarsien)
10 Noyau d'ossification de la tubérosité de la base du 5e métatarsien
11 Os cuboïde
12 Cunéiforme intermédiaire
13 Cunéiforme latéral
14 Cunéiforme médial
15 Os naviculaire
16 Talus

Figure 86 : Radiographie du pied en croissance, Face et Profil. (a) fille de 11 mois, (b) fille de 3 ans, (c) fille de 6 ans, (d) fille de 12 ans [149]

CHAPITRE III :
INTÉRÊTS MÉDICAUX ET MÉDICO-LÉGAUX DE L'ESTIMATION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE

« Sur tous les problèmes cliniques liés de près ou d'un peu plus loin à la croissance et au développement d'un enfant, l'analyse de la maturation squelettique et, si possible aussi, de la vitesse de cette maturation, est d'une importance capitale pour apprécier la situation actuelle et prévoir la croissance et le développement futurs ».

Professeur Michel SEMPÉ
Auxologie et maturation squelettique, 2013

III.1. L' « âge osseux » comme déterminant de l'état de maturation squelettique chez l'homme

III.2. Intérêts médicaux de l'estimation de la maturation squelettique

III.3. Intérêts médico-légaux de l'estimation de la maturation squelettique

III.4. Deux autres intérêts de l'estimation de la maturation squelettique

III.5. Limites de la précision et de la fiabilité de l'âge osseux appliqué à des fins médicale et médico-légale

III.1. L' « âge osseux » comme déterminant de l'état de maturation squelettique chez l'homme

L'âge osseux est une tentative chiffrée d'évaluation de la maturation squelettique [4, 32], il reflète le degré de maturation du squelette d'un enfant en croissance [87]. Pour un individu donné, il correspond à l'état de sa maturation squelettique en référence à celle de la majorité des individus de même sexe et de même âge [32].

Cet « âge osseux », comparée à l'âge civil des enfants, est approximatif. En effet, si l'AC a toujours une évolution linéaire, la maturation osseuse peut évoluer de façon différente avec périodes d'accélération et de ralentissement [87].

La détermination d'un « AO » peut s'intégrer dans une démarche médicale, le retard de croissance par exemple, et dans ce cas, il s'agit d'apprécier la maturation osseuse d'un individu et d'en assurer le suivi ; comme il peut s'intégrer dans une démarche médicolégale, la détermination de l'âge d'un mineur délinquant par exemple, et dans ce cas, il s'agit de déterminer un AC et non pas d'évaluer le développement physique, normal ou non, d'un enfant [34].

En effet, l'évaluation précise de la maturation squelettique revêt une importance médicale [36] : en pédiatrie et particulièrement en endocrinologie pédiatrique, qui s'intéresse au développement normal ou pathologique de l'enfant et de l'adolescent [23, 24, 36, 131], et demandée dans un bilan d'un retard de croissance staturo-pondérale [23, 24] ou d'un trouble de la puberté (précocité ou retard) [16, 23, 24] et comme outil de surveillance de nombreux traitements dont ceux faisant appel à l'hormone de croissance biosynthétique [4]. Elle est également très importante en orthopédie pédiatrique, dans la prise en charge des enfants présentant une inégalité de longueur des membres pelviens, pour guider les indications d'épiphysiodèse ou au contraire d'allongements des membres [23, 36]. En orthodontie, en psychologie et en psychomotricité du jeune enfant [23], en pneumologie, en cardiologie, en néphrologie, dans certaines maladies digestives, sanguines ou purement métaboliques, en neurologie parfois, pour ne citer que les grands appareils de l'enfant et de l'adolescent, la pratique raisonnée de ces radiographies permettrait une surveillance au long cours trop souvent abusivement confiée à des seuls examens biologiques qui ne peuvent être que des instantanés [132]. En plus, en médecine du sport chez les jeunes athlètes de haut niveau soumis à des entraînements intensifs, c'est l'AO qui doit être pris en compte pour déterminer la classe d'âge de pratique sportive et non l'AS ou l'AR [16, 23].

Malgré ça, l' « AO » doit toujours être intégré au contexte global et être complété par d'autres explorations morphologiques visant à déterminer l'étiologie des troubles [4].

Deux éléments fondamentaux qui doivent accompagner l'évaluation de l' « AO » sont d'une part le profil évolutif de l'AO du patient, d'autre part l'étude

morphologique des pièces squelettiques qui permet dans certains cas de suspecter l'existence d'une maladie osseuse constitutionnelle sous-jacente [4].

D'autre part, la détermination de l' «AO » présente un intérêt réel pour les médecins experts dans les contextes d'adoption lorsqu'il faut discuter la date de naissance, en médecine légale ou judiciaire impliquant des enfants mineurs, dont l'âge de maturation doit être précisé [4, 23] afin d'éviter les procédures d'expulsion à l'encontre des étrangers mineurs [4, 62], et dans l'identification des cadavres [4].

« Sur tous les problèmes cliniques liés de près ou d'un peu plus loin à la croissance et au développement d'un enfant, l'analyse de la maturation squelettique et, si possible aussi, de la vitesse de cette maturation, est d'une importance capitale pour apprécier la situation actuelle et prévoir la croissance et le développement futurs. » (A. Prader) [134].

III.2. Intérêts médicaux de l'estimation de la maturation squelettique :

L'évaluation de la maturation osseuse fournit au clinicien des informations rentables sur le plan médical.

Les principales indications d'une détermination de l'AO sont constituées par une discordance entre l'âge civil et le développement staturo-pondéral [4, 36], lors des troubles de la puberté [36], moins fréquemment par la surveillance de certaines maladies endocriniennes, métaboliques ou générales (hypothyroïdie, insuffisance rénale). L'AO est également utilisé en orthopédie pédiatrique pour déterminer l'évolutivité d'une scoliose [4], planifier le traitement des irrégularités de longueur des membres [4, 36].

Quelques règles générales qui concernent l'âge osseux (AO) confronté à l'âge civil (AC) et à l'âge statural (AS), semblent être très utiles dans l'orientation diagnostique et thérapeutique chez l'enfant et l'adolescent malades [89].

Parmi ces règles générales [4, 89] :

a. Un AO inférieur à l'AC est de meilleur pronostic pour la croissance ultérieure qu'un AO correspondant à l'âge réel (AR) ;
b. Un AO inférieur à l'AS est indicateur d'une meilleure chance de rattrapage ;
c. La meilleure chance de croissance d'un enfant resterait l'adéquation : AO < AS < AC ;
d. Un AO correspondant à l'AC est plus rarement lié à une maladie viscérale ;
e. Plus le retard de maturation est marqué, plus la présence d'une maladie générale viscérale est probable.

La détermination de l'AO, couplée ou non à l'analyse des paramètres cliniques, permet de dégager des orientations diagnostiques, des décisions thérapeutiques et des prévisions pronostiques vis-à-vis d'un nombre important de pathologies chez les enfants et les adolescents. A titre de rappel, les plus connues, nous citons : les excès de croissance, les retards de croissance, les pubertés précoces, les retards de puberté, les inégalités de longueurs des membres pelviens et la scoliose.

L'AO peut également être utile dans le suivi et l'aide à la prise en charge de nombreuses autres pathologies, telles les pathologies orthopédiques et traumatologiques pédiatriques : les ostéochondrites, les nanismes, les ruptures du ligament croisé antérieur [87], les fractures (pour apprécier leur potentiel de remodelage, inversement proportionnel à l'AO) [4]. Aussi, en pneumologie, en cardiologie, en néphrologie, dans certaines maladies digestives, sanguines ou purement métaboliques, en neurologie parfois, pour ne citer que les grands appareils de l'enfant et de l'adolescent, la pratique raisonnée des radiographies d'AO permettrait une surveillance au long cours trop souvent abusivement confiée à des seuls examens biologiques qui ne peuvent être que des instantanés [132].

Dans les lignes qui suivent, nous insistons sur les pathologies les plus connues.

1. Les excès de croissance :

Ils sont beaucoup moins fréquents que les déficits de croissance [4].

Ils correspondent à une taille anormalement élevée par rapport à la moyenne des individus dans une population du même âge chronologique et du même sexe, et dont le niveau statural est supérieur à +2 DS [27].

L'avance staturale est un motif moins fréquent de consultation en endocrinologie pédiatrique, car elle est souvent mieux vécue et inquiète moins. Les enfants de grande taille qui consultent sont surtout les filles de taille supérieure à +3 ou +4 DS chez lesquelles la gêne psychologique dans leur vie quotidienne conduisant, certaines, à une demande thérapeutique pressante [27].

Les excès de croissance se voient sous plusieurs formes :

a. **Gigantismes permanents :**

Ce sont des formes de l'excès de croissance staturopondérale quand ils dépassent 3 DS [4].

Le gigantisme hypophysaire [4]

Est lié à une hypersécrétion de GH d'origine adénomateuse est exceptionnel chez l'enfant. Il associe des signes endocriniens d'accélération de la croissance staturale, une avance de l'AO et des modifications morphologiques des mains, des pieds et du maxillaire inférieur du type acromégalique.

Le gigantisme cérébral ou syndrome de Sotos [4]

Il associe un retard mental variable avec une avance staturale de l'AO.

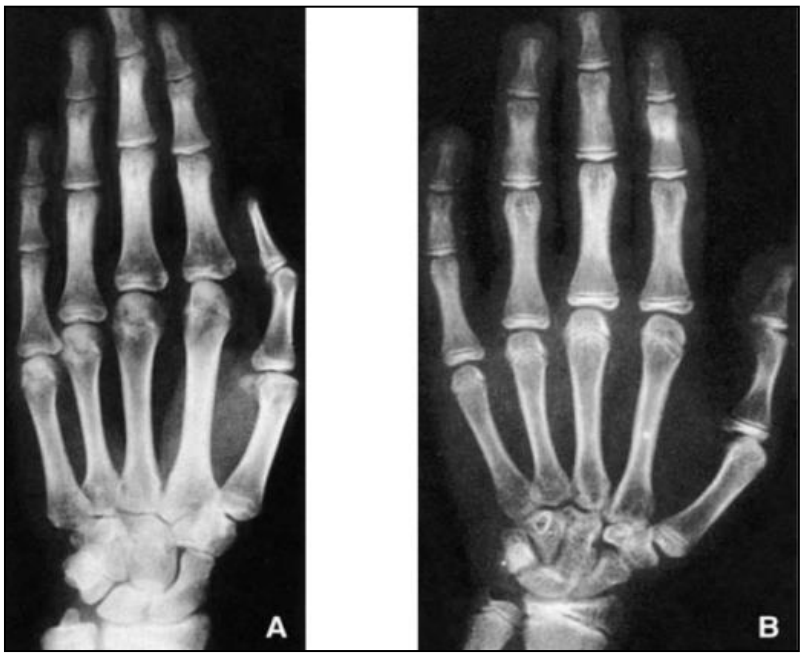


Figure 87 : Syndrome de Sotos, grande taille et atteinte neurologique chez un garçon de 14 ans [4]

Plusieurs syndromes peuvent s'accompagner d'un gigantisme avec ou sans avance de l'AO et les signes associés permettent en général d'évoquer le diagnostic : syndrome de Wiedemann-Beckwith avec macroglossie, hypertrophie

des viscères et hémihypertrophie corporelle, diabète lipoatrophique, syndromes de Marfan, Klinefelter, … [4]

b. **Gigantisme transitoire ou avances staturopondérales :**

Il s'agit d'une pathologie plus fréquente, et une forme de l'excès de croissance staturopondérale dépassant 3 DS [4].

On le rencontre dans des perturbations endocriniennes définies :

Hyperthyroïdie [4]

Il s'agit d'une pathologie rare chez l'enfant dont l'étiologie la plus fréquente est la maladie de Basedow. Le diagnostic est souvent évoqué cliniquement, devant l'existence de troubles du comportement et du caractère qui sont souvent le motif de consultation initiale, la présence d'un goitre, d'une exophtalmie et surtout d'une tachycardie.

Puberté précoce [4]

L'hyperandrogénie et l'hyperœstrogénie précoces entraînent une accélération souvent spectaculaire de la croissance en taille et en poids en même temps qu'une avance de la maturation osseuse.

Tableau 15 : Les étiologies des précocités sexuelles chez la fille [4]

Pubertés précoces centrales • Idiopathique : 90 % des cas • Cause tumorale : hamartome, dysgerminome, gliome (avec ou sans neurofibromatose de type 1) • Pathologies cérébrales connues : hydrocéphalie, séquelles de traumatisme crânien ou de méningite, d'irradiation… • Phacomatoses : neurofibromatose de type 1, sclérose tubéreuse de Bourneville
Pubertés précoces périphériques • Hyperandrogénie fréquente (hyperpilosité): ○ bloc surrénalien ○ tumeur virilisante de la surrénale (corticosurrénalome) • Hyperœstrogénies endogènes : ○ syndrome de Mac Cune-Albright : taches cutanées, dysplasie fibreuse des os et puberté précoce par autonomie ovarienne ○ tumeur sécrétante de l'ovaire : tumeur de la granulosa, rare.

2. Les retards de croissance :

Les retards de croissance sont beaucoup plus fréquents que les gigantismes [4], ils constituent un motif très fréquent de consultation en pédiatrie [27].

Ils posent deux problèmes : celui de l'étiologie d'une part et de l'indication d'un traitement d'autre part [4].

La disponibilité du GH humaine biosynthétique a modifié l'attitude médicale mais le diagnostic et le traitement d'un déficit en GH restent l'objet de nombreux débats [4].

Diagnostic d'un retard statural

Il est basé sur :

- Les éléments cliniques
- Les dosages hormonaux
- Le développement pubertaire
- L'âge osseux :

  La détermination de l'âge osseux, qui fait classiquement partie de la consultation pour retard statural, est fondamentale [4, 27, 131], elle évalue la maturation globale de l'organisme, tout en prenant en compte la variabilité normale de l'AO par rapport à l'AC (± 18 mois) et la variabilité de l'interprétation de la mesure [27]. En plus, l'AO permet de renseigner sur le pronostic de taille (pronostic statural) de l'enfant [32, 89], autrement dit d'approcher la fraction de sa taille adulte qu'un enfant a déjà prise, et donc sa potentialité de croissance résiduelle jusqu'à la taille adulte, c'est « la prédiction de taille adulte » qui se calcule, pour un enfant donné au-delà de 7 ans, à partir de sa taille actuelle et de son AO (méthode de Bayley et Pinneau) [27].

  Plusieurs conclusions peuvent être déduites à partir d'un AO et en le comparant aux âges civil et statural :

  - Un AO inférieur à l'AC est de meilleur pronostic qu'un AO correspondant à l'AC [4, 89], puisqu'il témoigne d'un potentiel de croissance préservé [4].
  - Un AO inférieur à l'AS indique aussi une meilleure chance de rattrapage [4, 89].
  - Le meilleur pronostic de croissance est donc observé dans le cas où l'AO est inférieur à l'AS, lui-même inférieur à l'AC [4, 89].
  - Un retard osseux majeur peut être le marqueur d'une cause organique de retard statural mais se rencontre aussi chez les enfants nés avec un RCIU, où il est alors souvent faussement rassurant [27].
  - En cas de retard pubertaire, l'AO est souvent en rapport avec le retard de maturation physique, et donc inférieur à 11 ans chez la fille, inférieur à 13 ans chez le garçon, sans préjuger de la cause. À l'inverse, un AO supérieur à 11 ans chez la fille, ou supérieur à 13 ans chez le garçon, alors que le patient est impubère, est anormal et oriente en premier lieu vers un hypogonadisme [27].
  - Un AO correspondant sensiblement à l'AC, chez un enfant de petite taille, évoque un retard de croissance génétique, un RCIU et, chez la fille de plus de 7-8 ans, un syndrome de Turner [32].
  - L'analyse de la maturation peut être particulièrement difficile chez les enfants ayant des antécédents de RCIU, dans le syndrome de Turner, ou dans certaines maladies osseuses constitutionnelles. Ceci rendra les « prédictions » de croissance et de taille adulte bien aléatoires [23].

- Un AO inférieur à l'AC en l'absence de maladie chronique, traduit un retard de maturation dont la cause la plus fréquente est le syndrome de croissance et puberté retardées idiopathique (delayed growth and adolescence), mais qui peut être également la traduction d'une insuffisance somatotrope, ou d'une insuffisance thyroïdienne congénitale [32].
- L'AO est en retard sur l'AC dans les retards de croissance accompagnant les maladies organiques et métaboliques chroniques (insuffisance rénale, maladie cœliaque...), les carences nutritionnelles et les corticothérapies au long cours, ainsi que dans le syndrome de Turner dans la petite enfance [32].

Et en évaluant le potentiel de croissance, l'attention sera également attirée par :

- La recherche de petits signes de rachitisme (aspect crénelé ou irrégulier des métaphyses, zones de densification métaphysaires) [87],
- La présence de pseudo-épiphyses plus fréquentes chez les enfants ayant présenté un RCIU, des déformations des métacarpiens ou des phalanges (en cône, élargissement, aspect soufflé...) pouvant être évocatrices de maladies osseuses constitutionnelles avec risque de petite taille [87],
- Des anomalies de longueurs du métacarpien du IV ou une déformation de Madelung de l'épiphyse distale du radius évocatrice du syndrome de Turner [87],
- Une brièveté de la deuxième phalange de l'auriculaire (P2 du V) ou une clinodactylie souvent associée à une petite taille [87],
- Des synostoses du carpe ou des phalanges évocatrices de maladie synostosante... [87].

Tableau 16 : Principales étiologies des retards de croissance à début postnatal [4]

Retard de cause endocrinienne • Insuffisance hypophysaire • Insuffisance thyroïdienne • Hypercortisolisme • Hypoparathyroïdisme
Retard lié aux anomalies chromosomiques • Délétion complète ou partielle d'un chromosome X (syndrome de Turner) • Monosomie et trisomie des autosomes
Retard lié aux maladies constitutionnelles du squelette
Retard secondaire • Maladie viscérale chronique, maladie métabolique • Carence affective (nanisme psychosocial)
Retard de croissance dit « essentiel »

3. Les pubertés précoces [30] :

La puberté précoce est définie par le développement des caractères sexuels avant l'âge de 8 ans chez la fille et de 9 à 10 ans chez le garçon. Ce développement peut correspondre à une puberté précoce pathologique ou à une puberté précoce non pathologique (appelée aussi variante de la puberté normale). La puberté précoce pathologique peut être d'origine centrale (appelée aussi vraie) ou périphérique (appelée aussi pseudo-puberté précoce).

Des examens complémentaires peuvent être nécessaires pour distinguer une puberté précoce pathologique d'une variante de la puberté normale.

Notons qu'une analyse de la maturation osseuse, dans un contexte de puberté précoce, est demandé, où on s'attardera sur la colonne du pouce (trapèze, M I, P1 et P2) tant les modifications peuvent y être précoces et rapides [23].

4. Les retards de puberté [30] :

Le retard pubertaire est défini par l'absence de développement des caractères sexuels au-delà de l'âge de 13 ans chez la fille et de 14 ans chez le garçon.

On distingue le retard pubertaire pathologique du retard pubertaire non pathologique ou simple, c'est-à-dire suivi d'un développement pubertaire spontané complet. Le retard pubertaire simple est beaucoup plus fréquent chez le garçon (80 % des retards pubertaires) que chez la fille. Le retard pubertaire pathologique peut être d'origine centrale hypothalamo-hypophysaire ou périphérique gonadique. Le retard pubertaire est responsable d'un retard à l'accélération de la vitesse de croissance staturale, accélération qui survient normalement à la puberté. Ceci explique que le motif de consultation soit souvent la petite taille. L'AO est en règle inférieur à l'AC et à l'AO de démarrage pubertaire.

5. Les inégalités de longueurs des membres pelviens :

Les paramètres de l'exploration de la croissance sont particulièrement importants autour de la période pubertaire en vue d'un traitement d'une inégalité de longueur des membres pelviens [87].

L'AO présente un intérêt tout particulier pour les inégalités de longueurs des membres pelviens et les défauts d'axe pour lesquels une épiphysiodèse [1] est envisagée. La datation précise de cette intervention est nécessaire pour pouvoir corriger l'anomalie [87].

L'utilisation de l'AC pour cette prévision, proposée par certains, ne semble pas logique. En effet, l'analyse d'une série de 60 enfants indemnes de toutes pathologies hormonales a montré une discordance entre l'AO mesuré à la main (Maturos™) et l'AC supérieur à 12 mois dans 30 % des cas [87]. C'est l'AO qui doit être envisagé pour planifier le traitement des irrégularités de longueur des membres [4].

[1] L'épiphysiodèse est une intervention chirurgicale au cours de laquelle le cartilage de croissance (plaque de croissance) du membre plus long est enlevé, afin de permettre au membre plus court de rattraper le retard de croissance avec le temps (Allongement et reconstruction d'un membre : types d'interventions chirurgicales).

L'ensemble des mesures va permettre l'utilisation de graphiques en vue de calculs prévisionnels d'inégalité. Les courbes de Green et Anderson évaluent la croissance résiduelle des cartilages de croissance : fémoral distal et tibial proximal (Fig. 88). La finalité de tels diagrammes ou courbes prévisionnelles est de fixer les dates idéales et guider l'indication thérapeutique des inégalités de longueur entre un allongement ou une épiphysiodèse chirurgicale [87].

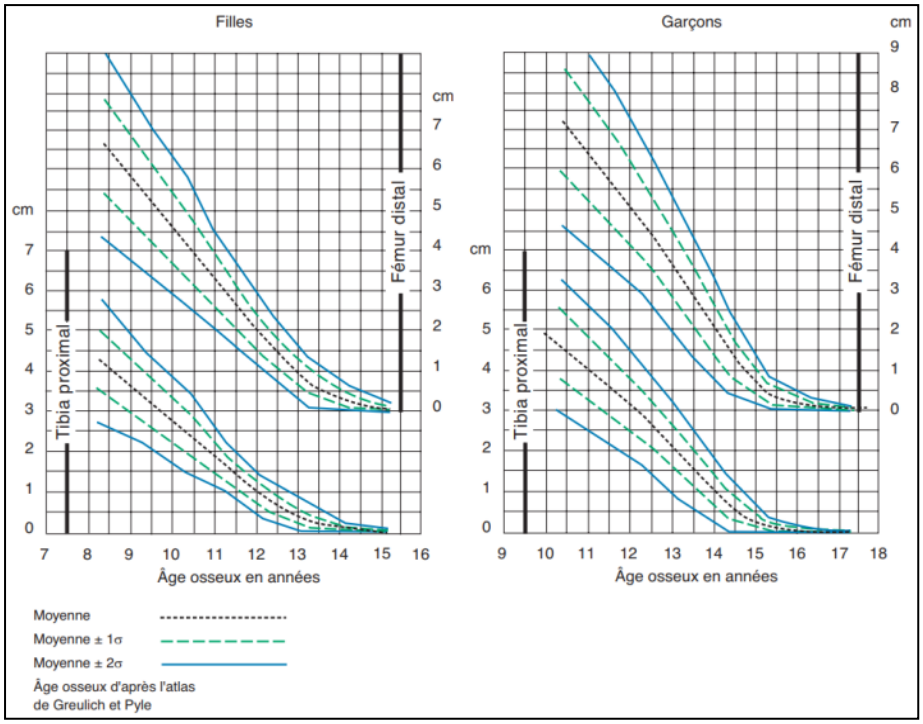


Figure 88 : Courbe de croissance résiduelle du fémur distal et du tibia proximal chez la fille et chez le garçon (d'après Green et Anderson) [87]

Les membres pelviens cessent de grandir chez la fille au moment des règles soit à 13 ans et 6 mois d'AO, et chez le garçon à 15 ans et 6 mois. La croissance restante des membres pelviens est faible dès le début de la puberté, par conséquent toute décision d'épiphysiodèse doit se prendre avant la puberté [55].

6. La scoliose :

Les paramètres de l'exploration de la croissance [87] ainsi que l'AO [4] sont particulièrement importants en période péri-pubertaire en vue de la surveillance d'une déviation vertébrale et déterminer l'évolutivité d'une scoliose [4, 87].

La cotation des crêtes iliaques, ou méthode dite de Risser, est surtout utilisée pour apprécier le risque potentiel évolutif d'une scoliose, sachant qu'un Risser à 5 signifie la fin de la croissance et donc la fin de la période d'évolutivité majeure de la scoliose [89]. Malgré ça, se limité au signe de Risser pour choisir ses indications en matière de scoliose est considéré inutile. Il faut tenir compte des caractères sexuels secondaires, de la vitesse de croissance annuelle, de la date des premières règles, de l'AO au niveau de la main. En se souvenant que la croissance est terminée 2 ans

après l'installation des règles, il sera illusoire d'espérer dans l'effet d'un corset [55]. Le degré de maturation donc, va renseigner sur les risques orthopédiques [89].

En conclusion : [137]

L'attention portée à la puberté, à sa préparation, au « passage de l'enfance à l'adolescence », à la durée probable des phases pré-, péri- et post-pubertaires permet d'affirmer que l'analyse de la maturation osseuse à elle seule permet de classer certains cas de « retards » :

- certains enfants inscrivent très tôt « dans leurs os » l'annonce d'une puberté différée sinon parfois très retardée : assurés de conserver un « capital » de maturation, ces futurs adolescents peuvent être rassurés mais leur éducation sera difficile et ils doivent être aidés ;
- d'autres enfants, tout aussi petits, ont une maturation osseuse déjà trop engagée pour que son évolution pubertaire puisse s'étendre sur de longues années ; ces cas pourraient bénéficier d'une thérapeutique anabolisante non virilisante à n'introduire qu'au moment de l'accélération de la maturation osseuse tant il semble vrai qu'alors le médicament ne peut l'accélérer plus s'il est manié avec les indispensables précautions ;
- les cas les plus difficiles sont ceux où les rythmes staturaux et maturatifs en général subissent des pauses inexpliquées et pas toujours synchrones ; là encore, c'est dans une perspective uniquement dynamique que ces « asynchronismes » doivent être étudiés et le coude est le plus fidèle des indicateurs auxquels il faut se référer pour se baser sur la puberté à venir.

Quel que soit le diagnostic posé, et il est bien certain que les alarmes sont souvent inutiles, il est des fois où la surveillance en elle-même et la magie de l'image radiographique permettent de faire mieux accepter ce qui sera inéluctablement une « petite taille génétique » parfois bien accablante ; - et pour mémoire, la surveillance et le pronostic des « gigantismes ».

III.3. Intérêts médico-légaux de l'estimation de la maturation squelettique

En pratique médico-légale, il est souvent nécessaire d'estimer l'âge d'un enfant ou d'un adolescent vivant dans un cadre pénal pour appliquer les lois correspondantes, comme aussi parfois est nécessaire d'estimer l'âge d'un individu décédé dans des procédures d'identification [35].

La détermination de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent par estimation de la maturation osseuse s'effectue de manière courante en médecine légale. Cette évaluation de l'âge est pratiquée sur des sujets dont la date de naissance est inconnue ou dissimulée, notamment la majorité, afin d'orienter vers des juridictions spécialisées [62].

Dans ce contexte, la justice ne manque pas à faire appel à la médecine pour l'aider à prendre en charge un mineur, qu'il soit en séjour irrégulier sur le territoire national, ou l'auteur d'une infraction, ou un délinquant chevronné qui connait pertinemment l'intérêt de minorer son âge lorsqu'il se fait arrêter ou encore la victime d'un crime ou d'un délit. Ces demandes, de plus en plus fréquentes de nos jours, traduisent le besoin des magistrats et enquêteurs de disposer d'une détermination précise et rapide de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent [81].

La détermination de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent est un acte médical [34, 53], procédant à une enquête et à un examen médical [153]. Dans certains cas, l'enfant interpellé n'a pas de documents officiels permettant de connaître son AC, la justice va dans ce cadre demander à un médecin, légiste ou non, de lui d'estimer l'âge de l'individu [34, 53] précisant si l'enfant est mineur ou majeur, une fois la responsabilité juridique est motivée, et ceci en raison des décisions judiciaires et poursuites pénales, spécialisées pour les mineurs, qui en découlent [53].

Depuis longtemps, on reconnaît que la justice applicable aux adultes n'est pas adaptée aux mineurs. Une justice pour les mineurs s'est imposée, en tenant compte de leurs tranches d'âge, afin de les protéger. Dans ce sens la législation consacre des procédures et des mesures souples prononcées pour une durée déterminée qui ne peut dépasser la date de la majorité civile de l'intéressé, et qui sont ainsi citées [34, 36, 52, 53, 80, 92, 102, 146, 153] :

- Admonestation (c.-à-d. avertissement sévère),
- Assistance éducative (c.-à-d. les mesures prises par le juge des enfants dans le but de le protéger),
- Comparution (c.-à-d. se trouver devant un tribunal),
- Détention (c.-à-d. de le garder prisonnier),
- Emprisonnement ou incarcération (c.-à-d. de le mettre en prison),
- Garde à vue (c.-à-d. une détention de courte durée avant une inculpation éventuelle),
- Interpellation (c.-à-d. demander des explications),

- Liberté surveillée (c.-à-d. période de mise à l'épreuve (d'un délinquant)),
- Mise en observation (c.-à-d. une procédure qui implique la privation de la liberté d'un individu),
- Placement (dans une institution publique d'éducation surveillée ou d'éducation corrective ; dans un établissement de formation professionnelle ; dans un établissement médical ou médico-pédagogique habilité ; dans un internat apte à recevoir des enfants délinquants d'âge scolaire ; dans un centre spécialisé de protection de l'enfance délinquante ; placement aux soins du service public chargé de l'assistance),
- Protection,
- Rééducation,
- Remise (du mineur) à ses parents, à un tuteur, à un centre d'accueil ou à une personne ou une famille digne de confiance,… etc

Toutes ces décisions s'inspirent de l'article 40 de la « Convention internationale des droits de l'enfant » de « Fonds des Nations unies pour l'enfance » ou UNICEF qui annonce que « Les États parties reconnaissent à tout enfant suspecté, accusé ou convaincu d'infraction à la loi pénale le droit à un traitement qui soit de nature à favoriser son sens de la dignité et de la valeur personnelle, qui renforce son respect pour les droits de l'homme et les libertés fondamentales d'autrui, et qui tienne compte de son âge ainsi que de la nécessité de faciliter sa réintégration dans la société et de lui faire assumer un rôle constructif au sein de celle-ci » [146].

La justice attendrait donc que la médecine, et notamment la radiologie qui présente le grand intérêt judiciaire de fournir des documents que l'on peut archiver et éventuellement réinterpréter, lui propose des méthodes d'évaluation de l'AO simples, économiques et fiables pour l'aider à classer sans ambiguïté les enfants dans leur classes d'âges [81].

Pour remplir sa mission, le médecin utilisera des critères d'évaluation qui seront recherchés par des actes non dolosifs, ne portant pas atteinte à l'intégrité corporelle de l'enfant ou de l'adolescent : un examen clinique (interrogatoire, inspection, palpation) et des examens complémentaires, essentiellement radiographiques, que seront relevés les différents paramètres permettant de proposer une fourchette d'estimation d'âge [53], voire un âge plus ou moins précis. Et qu'un mineur soit isolé, demandeur d'asile, délinquant ou victime d'un délit, l'expertise médicale s'efforcera de relever les mêmes critères énumérés ci-dessus pour tout le monde [54].

1. L' « enfant » dans la législation :

Dans la législation algérienne (art. 2) et internationale (art. 1), un « enfant » est tout être humain n'ayant pas atteint dix-huit (18) ans révolus [102, 146]. Le terme « mineur » a le même sens [102].

Connaître l'âge d'un enfant apparaît incontournable en regard d'une application stricte et correcte de la législation relative aux enfants. Pour cela, le législateur algérien [102] a fixé plusieurs paliers chronologiques motivant les demandes des

âges des enfants auprès des établissements médicaux et conditionnant par conséquent, le traitement judiciaire de chaque situation [80].
Ces paliers chronologiques correspondent à quatre « âges charnières » qui sont : 10 ans, 13 ans, 16 ans et 18 ans [34, 35, 102], qui intéressent le juge car la juridiction compétente va dépendre de la tranche d'âge de l'enfant [34].
En parlant de ces paliers chronologiques figurant dans la loi relative à la protection de l'enfant, il se trouve utile de les rappeler brièvement [102] :

- L'enfant âgé de **moins de dix (10) ans** ne peut faire l'objet de poursuites pénales. (art. 56)
- L'enfant dont l'âge est **de dix (10) ans et à moins de treize (13) ans**, le jour de la commission de l'infraction :
    - ne peut faire l'objet que de mesures de protection et de rééducation. (art. 57)
    - ne doit pas être placé dans un établissement pénitentiaire même à titre provisoire. (art. 58)
    - ne peut faire l'objet, si la contravention est établie, que d'une admonestation ou d'un placement sous le régime de la liberté surveillée si son intérêt l'exige. (art. 87)
- L'enfant dont l'âge est **inférieur à treize (13) ans** :
    - Si présumé avoir commis ou tenté de commettre une infraction ne peut faire l'objet d'une garde à vue. (art. 48)
    - ne peut être placé en détention provisoire. (art. 72)
- L'enfant dont l'âge est de **treize (13) ans, au moins**, présumé avoir commis ou tenté de commettre une infraction est placé en garde à vue qui ne doit pas excéder vingt-quatre (24) heures, pour les nécessités de l'enquête préliminaire, et dans les délits qui constituent un trouble manifeste à l'ordre public, ceux dont le maximum de la peine encourue est supérieur à cinq (5) ans d'emprisonnement et dans les crimes. (art. 49)
- L'enfant de **plus de treize (13) ans** ne peut être placé en détention provisoire, en matière de délit, lorsque le maximum de la peine prévue par la loi est inférieur ou égal à trois (3) ans d'emprisonnement. (art. 73)
- L'enfant **de treize (13) ans à moins de seize (16) ans** ne peut être placé en détention provisoire que dans les délits (dont le maximum de la peine prévue par la loi est supérieur à trois (3) ans d'emprisonnement) qui constituent un trouble grave et manifeste à l'ordre public ou lorsque cette détention est nécessaire pour sa protection (pour une période de deux (2) mois non renouvelable). (art. 73)

- L'enfant âgé de **treize (13) ans à dix-huit (18) ans** :
    - ne doit pas être placé dans un établissement pénitentiaire même à titre provisoire. Sauf nécessité, l'enfant est placé dans un centre de rééducation et de réinsertion des mineurs ou dans un quartier spécial réservé aux mineurs dans les établissements pénitentiaires. (art. 58)
    - peut, exceptionnellement, être puni d'une peine d'amende ou d'emprisonnement au lieu d'autres mesures de protection et d'éducation. (art. 86)
- L'enfant **de seize (16) ans à moins de dix-huit (18) ans**, ne peut être placé en détention provisoire que pour une durée de deux (2) mois renouvelable une seule (1) fois. (art. 73)
- La majorité pénale est précisée à l'âge de **dix-huit (18) ans** révolus le jour de l'infraction (art. 2) [102].
  Cet âge de 18 ans est l'âge frontière qui distingue les mineurs des majeurs, avec de nombreuses conséquences juridiques [80].

Cette « échelle » justifie clairement le besoin des magistrats et enquêteurs de disposer d'une évaluation d'âge objective et scientifique à opposer aux mineurs lorsque leur identité et/ou leur âge légal ne sont pas précisément établis [80].

2. Les domaines d'application :

Plusieurs situations que rencontre la justice concernent des enfants et des adolescents inconnus non porteurs de documents d'état civil et nécessitent la détermination de leurs âges osseux afin d'appliquer les mesures juridiques appropriées et adaptées à l'âge.

a. Détermination de l'âge d'un mineur décédé inconnu :

L'anthropologie médico-légale fait référence à l'identification classique par des techniques osseuses, notamment les «quatre fondamentaux» ou « big four » des anglo-saxons [sexe, âge (au décès), stature et origine géographique (ou groupe biologique)] [121].

Les techniques anthropologiques médico-légales sont utilisées [121] :

a- Sur des **corps squelettisés** : squelettes entiers ou partiels, parfois des os isolés ou des fragments osseux ;

b- Sur des **corps altérés** : par un processus *péri* ou *post mortem*, décomposés, carbonisés, immergés, mutilés ;

c- Sur des **corps récents** voire **frais** : pour faciliter l'identification ou apprécier de façon plus précise les lésions traumatiques.

La détermination de l'AO est utilisée pour identification des cadavres [4], bien que l'estimation de l'âge à partir du squelette soit un véritable challenge. Les méthodes sont multiples et donnent des renseignements qui se croisent ou qui sont complémentaires. Il faudra à la fin donner l'estimation d'une fourchette d'âges, la plus proche possible de la réalité [121].

Détermination de l'âge d'un nouveau-né à terme [121] **:**

Radiologiquement, quand l'épiphyse proximale de l'humérus est présente, cela signifie que l'enfant est à terme. Elle n'est jamais visible avant la 36ème semaine de gestation. Elle est présente chez 40% des nouveau-nés entre la 40ème et la 41ème semaine, et chez 82% après la 42ème semaine.

Trois points d'ossification sont des marqueurs du nouveau-né à terme :

- Le point épiphysaire fémoral distal (point de Béclard), qui a une grande signification, apparaît à 36 semaines (au début du 9ème mois),
- Le point épiphysaire tibial proximal, apparaît à 38 semaines,
- Le point d'ossification de l'os cuboïde, apparaît à la fin de 9ème mois, mais il est souvent invisible à la naissance, même si l'enfant est à terme.

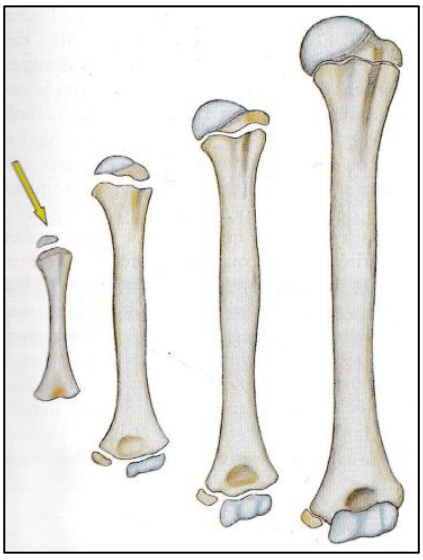


Figure 89 : Modifications de l'humérus à la naissance et à 5, 10 et 15 ans. Avec la présence de l'épiphyse proximale de l'humérus à la naissance (flèche) qui indique qu'un nouveau-né est à terme [121]

Tableau 17 : Quelques critères osseux permettant d'estimer que le nouveau-né est à terme [121]

Humérus	Epiphyse supérieure présente chez 40 % des nouveau-nés entre la 40e et la 41e semaine ; et chez 82 % des nouveau-nés après la 42e semaine
Fémur	Le point épiphysaire inférieur (point de Béclart) apparaît à 36 semaines, donc au début du 9e mois
Tibia	Le point épiphysaire supérieur apparaît à 38 semaines
Calcanéus	Le point calcanéen est présent (il apparaît à 24-26 SA)
Talus	Le point talien est présent (il apparaît à 26-28 SA)
Cuboïde	*Il apparaît à la fin du 9e mois, mais est souvent invisible chez un nouveau-né à terme*

Détermination de l'âge de la naissance jusqu'à l'adolescence [121] **:**

Les critères essentiels sont l'apparition des centres d'ossification, la minéralisation dentaire, l'éruption et la perte dentaires, la dimension des os, et

l'aspect et la fusion des épiphyses. Le critère le plus important dans cette tranche d'âge est dentaire, et en absence des dents, la maturation des os et leurs dimensions donnent des informations capitales. Pour les enfants à partir de 12 ans, il faut tenir compte des critères d'ossification.

Passage de l'adolescence à l'âge adulte [121] **:**

Le critère le plus important devient la fusion entre les épiphyses et les diaphyses des os longs, ainsi que l'ossification du pelvis, de la scapula, du sternum, du sacrum et des phalanges. Tous ces éléments sont particulièrement utiles entre 15 et 20 ans.

Deux critères nous paraissent particulièrement importants en pratique médico-légale : (a) la fermeture de la suture sphéno-basilaire, qui est un marqueur de passage de l'adolescence à l'âge adulte ; (b) la disparition de la suture incisive, qui a lieu au plus tôt vers 20 ans, habituellement vers 25 ans, et plus tard probablement vers 30 ans.

(a) Apparition des points d'ossification à l'adolescence :

Dérobert (1974) donne les points de repère suivants pour l'apparition des points d'ossification après 14 ans (Tab. 18).

Tableau 18 : Dates d'apparition des principaux points d'ossification après 14 ans chez l'enfant normal [121]

15 ans	Main, hanche, pied, épiphyses métacarpiennes, épiphyses phalangiennes
17 ans	Pied, épiphyse tibiale, épiphyse fibulaire
18 ans	Épaule, main, genou, tête humérale, grosse tubérosité, épiphyses radiale, ulnaire, fémorale, tibiale, et fibulaire

Les tableaux ci-dessous (19 et 20) indiquent les principaux points d'ossification tardifs, à l'adolescence ou chez l'adulte jeune, garçon et fille. Les points d'ossification sont classés par chronologie du début de l'apparition du point.

L'extrémité médiale (sternale) de la clavicule est particulièrement utile dans l'estimation de l'âge en anthropologie médico-légale. La facette articulaire de cette extrémité reste fortement déprimée jusqu'à la 18ème année (Fig. 90).

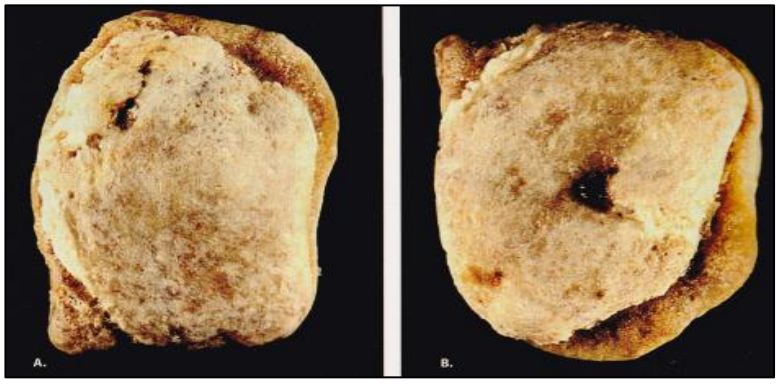


Figure 90 : Clavicule d'une femme de 19 ans, vue médiale [121]

Tableaux 19 et 20 : Apparition tardive de certains points d'ossification chez les sujets masculins (à gauche) et féminins (à droite) [121]

		Début	Fin
Tibia	Apparition du tubercule tibial	9	14
Os coxal	Apparition de l'épiphyse de l'épine iliaque antérieure et inférieure	10	13
Os coxal	Crête iliaque : apparition de l'épiphyse antérieure	12	15
Os coxal	Crête iliaque : apparition de l'épiphyse postérieure	12	15
Clavicule	Apparition de l'épiphyse médiale	12	21
Scapula	Apparition de l'épiphyse le long du pourtour glénoïdal	13	16
Scapula	Apparition de l'épiphyse, angle coracoïdien, et apex coracoïdien	13	16
Os coxal	Apparition de l'épiphyse ischiatique	13	16
Scapula	Apparition de l'épiphyse acromiale	13	16
Os coxal	Début d'ossification de la crête iliaque	14	17
Côte	Apparition de l'épiphyse, région non articulaire du tubercule	14	19
Scapula	Apparition des îlots épiphysaires le long du bord médial	15	17
Scapula	Apparition de l'épiphyse, angle caudal	15	17
Côte	Apparition de l'épiphyse (et fusion de la tête)	17	25
Côte	Apparition de l'épiphyse, région articulaire du tubercule	18	18,5
Clavicule	Apparition de l'épiphyse latérale	18	20
Os coxal	Apparition et développement de l'épiphyse au niveau du tubercule pubien	18	20
Os coxal	Début d'apparition des bords supérieur et inférieur de la surface symphysaire	23	27
Os coxal	Formation active du rempart ventral de la symphyse	24	30
Os coxal	Symphyse, rempart ventral et anneau symphysaire complets	35	36

		Début	Fin
Tibia	Apparition du tubercule tibial	8	12
Os coxal	Apparition de l'épiphyse de l'épine iliaque antérieure et inférieure	10	13
Os coxal	Crête iliaque : début d'ossification	11	15
Os coxal	Crête iliaque : apparition de l'épiphyse antérieure	12	15
Os coxal	Crête iliaque : apparition de l'épiphyse postérieure	12	15
Clavicule	Apparition de l'épiphyse médiale	12	21
Scapula	Apparition de l'épiphyse le long du pourtour glénoïdal	13	16
Scapula	Apparition de l'épiphyse acromiale	13	16
Scapula	Apparition de l'épiphyse, angle coracoïdien, et apex coracoïdien	13	16
Os coxal	Apparition de l'épiphyse ischiatique	13	16
Scapula	Apparition des îlots épiphysaires le long du bord médial	15	17
Scapula	Apparition de l'épiphyse, angle caudal	15	17
Clavicule	Apparition de l'épiphyse latérale	18	20
Os coxal	Apparition et développement de l'épiphyse au niveau du tubercule pubien	18	20
Os coxal	Début d'apparition des bords supérieur et inférieur de la surface symphysaire	23	27
Os coxal	Formation active du rempart ventral de la symphyse	24	30
Os coxal	Symphyse, rempart ventral et anneau symphysaire complets	35	36

Puis se développe le point épiphysaire complémentaire qui aplanit l'extrémité et lui donne sa forme définitive. Ce point secondaire épiphysaire se forme vers 18-19 ans, ou entre 12 et 21 ans, ou entre 16 et 20 ans, adhérant à l'extrémité médiale de la clavicule. Le tableau 21 indique les âges de fusion complète de l'extrémité médiale de la clavicule (100 % de l'échantillon fusionné).

Tableau 21 : Fusion de l'extrémité médiale de la clavicule [121]

M	F	Total	Origine géographique	Âges	Début de fusion	Fin de fusion	100 % de l'échantillon fusionné	Auteurs
Os secs								
(–)	(–)	50	USA	21-27	21	23	> 27	Stevenson (1924)
130	36	166	USA	19-27	19	25	> 27	Todd et D'Errico Jr (1928)
374	0	374	USA	17-31	18	23	31	McKern et Stewart (1957)
605	254	859	USA	11-40	16	21	34	Webb et Suchey (1985)
82	61	143	Royaume-Uni et Portugal	11-30	19	> 25	> 29	Black et Scheuer (1996)
60	71	131	Italie	14-25	17	19	25	Veschi et Facchini (2002)
254	106	360	Italie	17-94	18	22	32	Singh et Chavali (2011)
Radiographies conventionnelles								
206	231	437	Australie	11-26	(–)	22	26	Flecker (1932)
446	209	654	Inde (Bengale)	12-25	(–)	19	25	Galstaun (1937)
391	293	684	Inde (Pundjab)	11-30	18	22	25	Jit et Kulkarni (1976)
243	456	699	Allemagne	16-30	16	20	> 30	Schmeling et coll. (2004b)
61	62	123	Espagne	5-75	17	19,7	33	Garamendi et coll. (2011)
159	115	274	Italie	12-25	20	20	22-25	Cameriere et coll. (2012)
Tomodensitométries								
229	151	380	Allemagne	0-29	16	22	27	Kreitner et coll. (1998)
417	139	556	Allemagne	15-30	16	21	29	Schulz et coll. (2005)
50	50	100	Allemagne	16-25	16	19	> 25	Schulze et coll. (2006)
288	214	502	Allemagne	10-35	16	21	27	Kellinghaus et coll. (2010a,b)
455	219	674	Australie	15-25	16	18	24	Bassed et coll. (2011)

Il convient d'observer que : (a) certains échantillons ont une limite supérieure d'âge trop faible (25 ou 27 ans par exemple), qui ne permet pas de savoir à quel âge précisément tout l'échantillon serait fusionné, si la limite supérieure était plus élevée ; (b) il est difficile de comparer les publications entre elles car les définitions des fusions peuvent être différentes ; (c) la comparaison entre « fusion sur os secs » et « fusion radiologique conventionnelle », ou « fusion tomodensitométrique » est difficile.

(b) Fusion des épiphyses :

Entre 16 et 22 ans il convient de se fonder essentiellement sur les fusions épiphysaires (Fig. 91, de A à P).



Figure 91 : Fusions épiphysaires. (A, B) fusion partielle de la tête humérale ; (C) cicatrice de fusion récente du Tibia ; (D, E) fusion non encore acquise de la crête iliaque ; (F, G) aspect juvénile des surfaces articulaires ; (L) séparation complète entre épiphyse et diaphyse, absence totale de fusion ; (M1, 2) fusion partielle de l'épiphyse proximale de l'humérus ; (M3, 4) fusion totale de l'épiphyse distale de l'humérus ; (N) cicatrice récente de fusion du grand trochanter ; (P) épiphyse proximale totalement libre (non fusion) [121]

Selon Dérobert, à 22 ans, se soude habituellement la dernière épiphyse encore libre (extrémité médiale de la clavicule). La chronologie des fusions épiphysaires pendant cette période est établie schématiquement par cet auteur de la façon suivante, sans distinction de sexe (Tab. 22).

Les chiffres concernant la fusion des pièces osseuses sont dépendants du sexe, de la population concernée, mais aussi de la façon d'appréhender le stade de fusion, soit totale, soit partielle (classification de Stewart en cinq stades de fusion, de 0 à 4).

Tableau 22 : Chronologie de fusion des épiphyses [121]

15-16 ans	Aucune soudure épiphysaire au niveau des os longs de la scapula, de la clavicule, des vertèbres et des côtes ; toutes les épiphyses sont détachées et séparées de la diaphyse ; les pièces sternales et sacrées sont séparées ; le cartilage en Y de l'os coxal n'est pas soudé ; les pièces coxales sont séparées
17 ans	L'ordre schématique de fusion épiphysaire est (1) olécrane ; (2) extrémité inférieure de l'humérus ; (3) épiphyses métacarpiennes et métatarsiennes ; (4) cartilage en Y de l'os coxal ; (5) extrémité supérieure du fémur (tête fémorale et trochanter) (6) et inconstamment extrémité supérieure du tibia, extrémité inférieure de la fibula
18 ans	(1) Acromion-coracoïde ; (2) épicondyle ; (3) extrémité supérieure du radius ; (4) tête de l'humérus (inconstant) ; (5) épiphyses des métacarpiens et des métatarsiens (complètement) ; (6) extrémité supérieure du fémur (tête et trochanter) ; (7) extrémité inférieure du tibia (presque toujours soudée) ; (8) pièces inférieures du sacrum qui se soudent en dehors (partie latérale)
19 ans	Soudure complète ou partielle de (1) épitrochlée ; (2) tête humérale ; (3) tête fémorale et extrémité inférieure, extrémités supérieure et inférieure du tibia. Seules restent détachées l'extrémité inférieure de l'ulna
20 ans	Toutes les épiphyses se soudent, ont tendance à s'ossifier : épiphyses du fémur, tibia, et fibula. Les crêtes marginales vertébrales ne sont pas toutes complètement fixées (la suture est bien visible), de même que les épiphyses des ailes iliaques ; S3-S4 se soudent
21 ans	La tête humérale, assez rarement, peut ne pas être entièrement soudée, les épiphyses des ailes iliaques se soudent complètement
22 ans	L'épiphyse sternale de la clavicule commence à se souder (alors que jusqu'alors elle était restée détachée) ; cette épiphyse a un aspect bombé, mais la jonction est bien visible, les bords sont décollés ; les corps de S1-S2 restent séparés ; les crêtes marginales vertébrales sont soudées mais la suture reste bien visible. En règle générale, jusqu'à 22 ans, aucune synostose crânienne n'est oblitérée

Ainsi donc tous ces chiffres doivent être utilisés avec prudence et ne sont pas toujours comparables. La séquence temporelle, de l'apparition des centres d'ossification que de la fusion des épiphyses, a fait l'objet de nombreux travaux. McKern et Stewart (1957) ont étudié l'union des épiphyses de jeunes américains de sexe masculin, décédés dans la guerre de Corée (Tab. 23).

Tableau 23 : Âges (années) de fusion des épiphyses aux diaphyses [121]

	M	F
Membres supérieurs		
Clavicule médiale	22-24	21-23
Scapula médiale	16-22	16-22
Scapula latérale et inférieure	20-24	19-21
Humérus proximal	20-25	18-22
Coude	14-18	14-17
Poignet	17-22	16-21
Phalanges	16-20	16-20
Membres inférieurs		
Bassin, aile iliaque	21-24	21-24
Fusion entre ilium et pubis	15-18	15-18
Ischium	21-24	17-20
Fémur proximal	18-21	15-19
Genou	17-20	15-19
Cheville	17-19	15-18
Calcanéus	16-19	16-19
Métatarse I proximal	16-20	16-20
Phalanges	15-20	15-20

Beaucoup d'études se contentent d'une moyenne de la date de fusion (Greulich et Pyle 1959 ; pyle et Hoerr 1955). Par contre, McKern et Stewart (1957)

étudient également les variations autour de la moyenne, et soulignent qu'il existe une période de plusieurs années entre le début et la fin de la fusion. Stewart compare les données de plusieurs travaux et constate des variations de deux ans ou plus pour la plupart des épiphyses. Il note également que les estimations macroscopiques sont un peu plus avancées (en âges) par rapport aux estimations radiologiques. Tous ces éléments nous indiquent qu'il faut substituer la notion binaire de « non fusion » ou « fusion », à la notion de stades de fusion ; et qu'il faut prendre garde au caractère macroscopique ou radiologique de l'estimation, selon les travaux. Les fusions ont souvent été divisées en cinq stades, schématisés en pratique de la façon suivante (Tab. 24) :

Tableau 24 : Définition pratique des stades de fusion des épiphyses [121]

Stade 0	Aucune fusion
Stade 1	Un quart fusionné
Stade 2	La moitié (deux quarts) fusionnée
Stade 3	Trois quarts fusionnés
Stade 4	Fusion complète (quatre quarts fusionnés)

Mais il existe de nombreuses publications avec un nombre de stades différents (par exemple trois stades : non fusion, fusion partielle, fusion totale), ce qui ne facilite pas la comparaison des différentes publications entre elles. Les évaluations se font souvent actuellement par TDM et IRM nucléaire.

L'estimation radiologique de la fusion nécessite de l'expérience, car beaucoup de sites montrent la persistance de lignes radiologiques quand la fusion est acquise, qui peuvent en imposer pour une fusion incomplète.

Les épiphyses les plus utiles pour l'estimation de l'âge sont : l'épiphyse proximale de l'humérus ; l'épicondyle médial ; l'épiphyse distale du radius ; la tête fémorale ; l'épiphyse distale du fémur ; la crête iliaque ; l'extrémité médiale de la clavicule. Mais il convient bien sûr d'examiner tous les os disponibles. Stewart donne certains éléments utiles pour l'estimation de l'âge à partir de l'extrémité médiale de la clavicule (Tab. 25).

Tableau 25 : Estimation de l'âge en fonction du stade de fusion de la clavicule [121]

Topographie	Âge
Clavicule médiale	
Séparation complète épiphyse/diaphyse	< 20
Petit nodule osseux adhérent au centre	20-22
Nodule osseux plus développé, fusionné partiellement	23-24
Union presque complète	25-26
Union complète	≥ 26

Le tableau 26 résume les estimations d'âge en fonction des stades de fusion débutante ou avancée, du site osseux, et des auteurs scientifiques. On soulignera que McKern, Stewart et Stevenson parlent de la fusion macroscopique (observée à l'œil nu) ; alors que Davies, Parsons, Paterson, Flecker, décrivent les fusions à partir de radiographies.

Tableau 26 : Estimation de l'âge en fonction du stade de fusion, débutante ou avancée [121]

Topographie	Âge	Auteurs
Clavicule		
Clavicule médiale		
Union débutante	21	Stevenson (1924) (C)
Union débutante	18	McKern et Stewart (1957) (M)
Union avancée	25	Flecker (1942) (M)
Union avancée	26,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	27	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	30	McKern et Stewart (1957) (M)
Acromion		
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19,2	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16,1	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)
Humérus		
Humérus proximal		
Union débutante	18,2	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	18	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	16	Flecker (1942) (M)
Union débutante	15,7	Flecker (1942) (F)
Union débutante	19	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	21	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	19	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	21	Paterson (1929) (M)
Union avancée	18	Paterson (1929) (F)
Union avancée	19,2	Flecker (1942) (M)
Union avancée	20,4	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	23	McKern et Stewart (1957) (M)
Humérus distal		
Union débutante	16,3	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	14	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	14,6	Flecker (1942) (M)
Union débutante	13,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	16	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16	Flecker (1942) (F)
Union avancée	< 17	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	< 17	McKern et Stewart (1957) (M)
Épicondyle médial		
Union débutante	14	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	12	Flecker (1942) (M)
Union débutante	10	Flecker (1942) (F)
Union avancée	20	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	19	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	17	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Radius		
Radius proximal		
Union débutante	14	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	14	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	14	Flecker (1942) (M)
Union avancée	19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	18-19	Paterson (1929) (M)
Union avancée	14-15	Paterson (1929) (F)
Union avancée	20,4	Flecker (1942) (M)
Union avancée	19,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Radius distal		
Union débutante	17	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	16	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	17,3	Flecker (1942) (M)
Union débutante	15,9	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	19	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	21	Paterson (1929) (M)
Union avancée	19-20	Paterson (1929) (F)
Union avancée	23	Flecker (1942) (M)
Union avancée	20,4	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)

Ulna		
Ulna proximal		
Union débutante	15	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	14	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	13,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	18-19	Paterson (1929) (M)
Union avancée	14-15	Paterson (1929) (F)
Union avancée	17,5	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	17-18	McKern et Stewart (1957) (M)
Ulna distal		
Union débutante	16	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union débutante	17,3	Flecker (1942) (M)
Union débutante	15	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	20	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	19	Borovanský et Hněvkovský (1929) (M)
Union avancée	21	Paterson (1929) (M)
Union avancée	19-20	Paterson (1929) (F)
Union avancée	23	Flecker (1942) (M)
Union avancée	22	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)
Ilium		
Union débutante	17,1	Flecker (1942) (F)
Union débutante	19	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22,8	Flecker (1942) (M)
Union avancée	22,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	22	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)
Fémur		
Fémur proximal		
Tête		
Union débutante	16,3	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	14	Flecker (1942) (M)
Union débutante	13,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	19-20	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)

Topographie	Âge	Auteurs
Union avancée	17	Paterson (1929) (F)
Union avancée	20,2	Flecker (1942) (M)
Union avancée	18,2	Flecker (1942) (F)
Union avancée	19	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Grand trochanter		
Union débutante	15,8	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	15,8	Flecker (1942) (M)
Union débutante	14,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18-19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16-17	Paterson (1929) (F)
Union avancée	17,5	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Petit trochanter		
Union débutante	16	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	17	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16-17	Paterson (1929) (F)
Union avancée	17,9	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Fémur distal		
Union débutante	17	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	16	Flecker (1942) (M)
Union débutante	14	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16-17	Paterson (1929) (F)
Union avancée	19	Flecker (1942) (M)
Union avancée	19	Flecker (1942) (F)
Union avancée	20	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	21	McKern et Stewart (1957) (M)
Tibia		
Tibia proximal		
Union débutante	15	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	16	Flecker (1942) (M)
Union débutante	14	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)

Topographie	Âge	Auteurs
Union avancée	19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18-19	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16-17	Paterson (1929) (F)
Union avancée	19	Flecker (1942) (M)
Union avancée	18	Flecker (1942) (F)
Union avancée	21	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)
Tibia distal		
Union débutante	16	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	14,8	Flecker (1942) (M)
Union débutante	13	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	17-18	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16	Paterson (1929) (F)
Union avancée	18	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	19	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Fibula		
Fibula proximal		
Union débutante	17	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	16	Flecker (1942) (M)
Union débutante	14	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	21	Davies et Parsons (1927) (C)

Topographie	Âge	Auteurs
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16	Paterson (1929) (F)
Union avancée	19,7	Flecker (1942) (M)
Union avancée	18	Flecker (1942) (F)
Union avancée	20	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	21	McKern et Stewart (1957) (M)
Fibula distal		
Union débutante	17	Davies et Parsons (1927) (C)
Union débutante	15	Flecker (1942) (M)
Union débutante	14,8	Flecker (1942) (F)
Union débutante	18	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	18-19	Davies et Parsons (1927) (C)
Union avancée	18	Paterson (1929) (M)
Union avancée	16	Paterson (1929) (F)
Union avancée	18	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16,3	Flecker (1942) (F)
Union avancée	19	Stevenson (1924) (C)
Union avancée	19	McKern et Stewart (1957) (M)
Calcanéus		
Union débutante	14,5	Flecker (1942) (M)
Union débutante	12,8	Flecker (1942) (F)
Union avancée	18	Flecker (1942) (M)
Union avancée	16	Flecker (1942) (F)
Union avancée	22	McKern et Stewart (1957) (M)

La définition d'union débutante varie un peu selon les auteurs, mais on retient en général le début d'un pont entre épiphyse et métaphyse. Selon les auteurs, l'âge de fusion débutante varie pour quelques épiphyses, parfois de quatre années. Pour des stades d'union plus tardifs, on a parfois des variations de cinq années, par exemple pour la fusion de l'épiphyse distale de l'humérus. Le problème est que la fusion tardive n'est pas toujours définie de la même façon : certains auteurs prennent l'âge le plus jeune où toutes les épiphyses en question sont totalement fusionnées ; d'autres prennent l'âge le plus avancé, après que chaque squelette dans l'échantillon montre une fusion complète pour l'épiphyse concernée ; pour d'autres enfin l'âge le plus avancé est l'individu le plus âgé dans l'échantillon, où la fusion n'a pas encore eu lieu. Ces variations expliquent en partie de nombreuses disparités selon les travaux publiés.

Tableau 27 : Pourcentage de sujets de l'échantillon présentant une fusion totale, sujets de sexe masculin uniquement [121]

Topographie		Pourcentage	Âges (années)
Clavicule		37 %	24-25
		100 %	31
Scapula	Acromion	40 %	17
		100 %	23
	Angle inférieur	100 %	23
	Bord vertébral	20 %	17
		100 %	23

Le tableau 27 exprime le pourcentage de sujets masculins d'un échantillon présentant une fusion complète, en fonction de l'âge :
Il est très utile en médecine légale de connaître les âges auxquels 100% des populations étudiées ont acquis la fusion complète. Les travaux de McKern et Stewart sont particulièrement utiles dans ce domaine. On notera que leur échantillon n'est constitué que de sujets de sexe masculin (Tab. 28). Il s'agissait de jeunes soldats américains ayant fait la guerre de Corée.

Tableau 28 : Fusion complète (stade 4) acquise chez 100 % des sujets de l'échantillon, sexe masculin uniquement [121]

Épiphyses	Âge (ans)
Bassin	
Crête iliaque	23
Ischium	24-25
Clavicule médiale (D ou G)	31
Scapula	
Acromion	23
Angle inférieur	23
Bord vertébral	23

On peut par exemple affirmer, selon les données de ce tableau, qu'en cas de fusion non totale de la crête iliaque, le sujet a moins de 23 ans dans cette population puisque 100 % des sujets de 23 ans de l'échantillon ont fait leur fusion sur cette localisation.
D'une façon générale, il existe de grandes différences des stades de fusion selon le sexe : les filles sont en avance de 25 % environ, sur les garçons du même âge. Pour le genou, l'avance serait moindre (environ 19 %). Les données synthétisées par Stewart, Krogman et Iscan montrent bien que pour la plupart des épiphyses, les filles ont fusionné un à deux ans plus tôt que les garçons. La conséquence est qu'il convient de déterminer d'abord le sexe, avant d'estimer l'âge à partir des fusions. La difficulté est que le sexe des juvéniles est difficile à déterminer ; dans les cas difficiles, il convient d'effectuer l'estimation pour chaque sexe, ou attendre les résultats de l'ADN.
Une remarque importante concernant certaines épiphyses qui fusionnent tardivement : normalement par « adulte », nous entendons les squelettes où toutes les épiphyses ont fusionné avec les diaphyses correspondantes, après environ 22 ans.
Les fusions tardives (Tab. 29) sont très intéressantes dans l'estimation de l'âge.

Tableau 29 : Epiphyses à fusion tardive, au-delà de 22 ans [121]

Topographie	Périodes de fusion (ans)	
Ceinture scapulaire		
Clavicule médiale	Début de fusion	16-21 (M)
	Fin de fusion	16-31 (M)
Scapula: acromion	23 (M)	
Scapula: fusion complète angle caudal et bord médial	23-23,5	
Ceinture pelvienne		
Crête iliaque: fusion de l'épiphyse postérieure	17-23	
Crête iliaque: fusion complète de la crête iliaque	20-23	
Fusion complète de l'épine isciatique	20-23	

En dehors des localisations indiquées dans le tableau ci-dessus, les fusions tardives concernent également la base du 5ème métatarsien, la tubérosité du calcanéus (rare), voire l'épiphyse distale du radius, de l'ulna.

En conclusion, il faut souligner quelques éléments clés dans l'appréciation de l'AO chez l'adolescent et l'adulte jeune, par rapport à l'AR du sujet :

- Les études pratiquées sur des enfants de classes sociales différentes ne donnent en général pas de résultats comparables ;
- Les variations entre les différents groupes biologiques sont certaines ;
- Les mêmes groupes biologiques peuvent avoir des évolutions différentes quand les sujets changent de lieu géographique, et donc d'environnement diététique, social etc. (l'exemple typique est la différence d'évolution entre les populations noires américaines et les populations noires africaines ; de même chez des jumeaux homozygotes séparés, ayant un environnement diététique et social totalement différent) ;
- Il existe une évolution certaine entre le début du 20ème siècle et la fin du 20ème, ou le début de 21ème siècle ;
- La différence entre les deux sexes est notable, aussi bien en ce qui concerne l'ordre d'apparition des points d'ossification, que de leur date;
- Il existe des différences d'appréciation de l'AO en fonction de la localisation étudiée chez un même sujet (par exemple des différences de 14 mois sont possibles entre la main et le genou, chez des sujets normaux).

b. Détermination de l'âge d'un mineur réfugié / requérant d'asile :

L'« enfant réfugié », dans la législation algérienne, est « celui qui a été contraint de fuir son pays en traversant des frontières internationales et en demandant le droit d'asile ou toute autre forme de protection internationale » (art. 2) [102].

La Convention de Genève de 1951 et le Protocole de 1967 relatif au statut des réfugiés donnent au réfugié une définition indépendante de l'âge et ne prévoient aucune disposition spéciale concernant le statut des « enfants réfugiés » [145]. Le terme « réfugié » s'applique à toute « personne qui a fui son pays craignant avec raison d'être persécutée du fait de sa race, de sa religion, de sa nationalité, de son appartenance à un certain groupe social ou de ses opinions politiques » (art. 1) [79].

L'application de ce critère de définition aux enfants ne pose normalement aucun problème lorsque, comme dans la majorité des cas, ils sont accompagnés d'un ou de ses deux parents. Il est généralement convenu, sur la base du principe de l'unité de la famille, que lorsque le chef de famille répond aux critères énoncés dans la définition, les personnes à sa charge se voient également accorder la qualité de réfugiés [145].

Cependant, les enfants réfugiés peuvent ne pas être accompagnés de leurs parents, ce sont « les enfants réfugiés non accompagnés » qui sont séparés de leurs parents et qui n'ont pas été confié à un adulte de par la loi ou la coutume. Dans ces cas d'enfants, la tâche devient plus compliquée, même lorsqu'une solution durable a été trouvée, des problèmes d'intégration peuvent se poser, surtout quand il s'agit de groupes vulnérables tels que les enfants handicapés ou séjournant pendant de longues périodes dans des camps [145].

Pour pallier le problème d'enfants réfugiés non accompagnés, l'Agence des Nations Unies pour les réfugiés, le HCR, a mis au point des directives générales pour une prise en charge adéquate de ces enfants, nécessitant de déterminer la maturité du mineur en fonction de ses antécédents personnels, familiaux et culturels [145]. Par conséquent, les enfants réfugiés non accompagnés âgés de plus de quinze (15) ans ont en général une maturité suffisante pour prendre eux-mêmes une décision sur ce point. Selon leur degré de maturité, les enfants âgés de plus de neuf (9) ou dix (10) ans peuvent être eux aussi capables de faire un choix rationnel si on leur fournit des informations appropriées ; il faut donc tenir dûment compte de leurs préférences. Quant aux enfants âgés de moins de neuf (9) ou dix (10) ans, ils risquent de ne pas être suffisamment mûrs pour émettre un jugement indépendant ; il faut leur permettre d'exprimer leur opinion, mais c'est l'organe de décision compétent qui doit déterminer la solution durable susceptible de servir au mieux leurs intérêts [145].

Dans ce contexte, la détermination de l'âge de l'enfant réfugié demandeur d'asile revêt une importance capitale pour lui, car elle peut avoir de lourdes

conséquences sur son avenir [48] : impossible de reconduire à la frontière un mineur étranger, moins de dix-huit (de 18) ans, en séjour irrégulier [4, 80], même les majeurs étrangers de 18 à 21 ans en séjour irrégulier peuvent, dans certaines circonstances, bénéficier d'une assistance spécifique [80].

L'asile est une procédure permettant l'obtention d'une protection internationale (statut de réfugié ou protection subsidiaire) à la personne subissant des (risques de) persécutions ou des menaces graves dans son pays d'origine [58]. Les gouvernements doivent prendre les mesures nécessaires pour la protection des réfugiés mineurs, notamment des enfants isolés. D'ailleurs, l'article 22 de la Convention internationale relative aux droits de l'enfant prévoit quant à elle que [58] « les États parties prennent les mesures appropriées pour qu'un enfant qui cherche à obtenir le statut de réfugié ou qui est considéré comme réfugié en vertu des règles et procédures du droit international ou national applicable, qu'il soit seul ou accompagné…, bénéficie de la protection et de l'assistance humanitaire voulues pour lui permettre de jouir des droits que lui reconnaissent la présente Convention et les autres instruments internationaux relatifs aux droits de l'homme ou de caractère humanitaire auxquels lesdits États sont parties » [146].

Victimes parfois indirectes des persécutions subies par leurs parents, ces enfants, du fait de leur vulnérabilité, peuvent prétendre au statut de réfugié au même titre que les adultes. La demande d'asile peut être entamée durant la minorité, sans attendre le passage à la majorité [58].

En effet, en Suisse par exemple, le Code civil suisse, la Loi sur l'asile et la jurisprudence de la Commission suisse de Recours en matière d'Asile (CRA) offrent une série de garanties et de protections particulières qui s'adressent exclusivement aux requérants d'asile mineurs : dispositions spéciales, droit à un tuteur, à un avocat, etc. et ce, après avoir recours aux examens osseux, qui consiste en une radiographie de la main gauche [48].

L'Office fédéral des réfugiés continue à avoir recours aux radiographies du poignet pour déterminer si un requérant est mineur ou majeur, mais l'analyse osseuse doit diverger au moins de trois ans de l'âge déclaré par le demandeur d'asile pour être prise en compte. Aussi, la CRA admet l'utilisation des tests osseux tout en précisant qu'une marge d'erreur de deux ans et demi à trois ans doit être prise en compte [48].

Donc, un seul âge qui s'applique et sera défini aux enfants réfugiés et demandeurs d'asile et qui relève de la compétence du HCR : l'âge dix-huit (18) ans [53, 54, 145], c'est aussi cette formule qui a été adoptée dans l'article premier de la Convention des Nations Unies relative aux droits de l'enfant, sauf si, conformément à la législation nationale, l'âge de la majorité est fixé plus tôt [145, 146].

c. <u>Détermination de l'âge d'un mineur isolé / mineur isolé étranger :</u>

Un Mineur Isolé Etranger (MIE) ou Mineur Non Accompagné (MNA) [105, 123] est un jeune de moins de 18 ans qui arrivent sur un territoire, autre que son pays, qui n'a pas sa nationalité et se trouve séparé de ses représentants légaux sur le sol de ce nouveau pays [58, 123]. De sa minorité découle une incapacité juridique, et de l'absence de représentant légal une situation d'isolement et un besoin de protection [58].

Ces jeunes sont essentiellement des adolescents qui ont quitté leur pays, souvent précipitamment, pour arriver à leur destination après un long voyage souvent passé dans de très mauvaises conditions [122]. La migration de ce groupe d'enfants extraordinaires, minoritaires, interculturels et particulièrement vulnérables [105], qui suivent des parcours migratoires similaires à ceux des adultes [58], est un phénomène unique car elle implique qu'un enfant fasse le choix de risquer sa vie pour diverses raisons, dans l'espoir de rejoindre un pays développé et ainsi accéder à une vie meilleure et sécuritaire [105]. Leur isolement peut être très mal vécu, voire devenir un vecteur de stress et de traumatismes [92].

Au XXIème siècle, ce phénomène migratoire a pris une ampleur considérable [105]. Une très grande majorité des MIE sont des garçons, on note cependant la présence de jeunes filles migrantes, dont la vulnérabilité implique une attention particulière. La plupart des MIE sont âgés plus de 15 ans [58, 122].

Il n'existe pas de statut juridique propre aux MIE, une législation spécifique qui reconnaît leurs droits [58, 122], ces derniers se trouvent à un croisement, entre le droit des étrangers et, au titre de l'enfance en danger, le droit de protection de l'enfance, qui ne pose aucune condition de nationalité. Cette dualité imprègne l'ensemble des enjeux liés à la problématique des MIE [58]. Or, ces MNA doivent être considérés comme des « enfants en danger » que le droit impose de les traiter avec une particulière attention et de les assurer la protection jusqu'à leurs 18 ans [122], au lieu de les percevoir comme des migrants et étrangers en situation irrégulière, comme des suspectés de fraude, comme des majeurs, voire même comme des délinquants et traités comme tels.

En effet, ces mineurs sont considérés, d'un point de vue juridique, comme « mineurs en danger » du fait de l'absence de personne ressource pouvant les recueillir, et de la vulnérabilité due à leur jeune âge, ils doivent par conséquent, bénéficier du droit de protection avant leurs dix-huit (18) ans [123]. Car à l'approche de leurs 18 ans, les jeunes qui n'auront pas été régularisés se retrouvent en situation de grande fragilité. Ils vivent dans une grande vulnérabilité et regardent vers un avenir incertain. Car, avoir 18 ans et être sans papiers, signifie être exposer, en cas de contrôle de police,

à une interpellation qui peut conduire à la mise en rétention administrative du jeune et finir par son éloignement du territoire [92].

Le statut d'enfant devrait prévaloir, conformément aux engagements des états, au titre de la Convention internationale relative aux droits de l'enfant et mis en œuvre par les différents acteurs institutionnels. Leur vulnérabilité particulière doit être prise en compte dans tous les aspects de l'accompagnement des MIE, pour garantir à ces jeunes le respect de leurs droits ainsi que la possibilité de bâtir des projets de vie à la fois réalisables et épanouissants [58]. La détermination de l'âge des enfants et des adolescents étrangers peut, donc se révéler indispensable pour définir les droits et protections dont ils peuvent ou doivent bénéficier en fonction de ce statut [52].

Ces « mineurs en danger », qu'ils soient isolés ou isolés étrangers, étaient déjà évoqués dans la législation algérienne, l'article 2 de la loi n° 15-12 relative à la protection de l'enfant : l'« enfant en danger » est « l'enfant dont la santé, la moralité, l'éducation ou la sécurité sont en danger ou susceptibles de l'être ou dont les conditions de vie, ou le comportement sont susceptibles de l'exposer à un danger éventuel ou compromettant son avenir, ou dont l'environnement expose son bien-être physique, psychologique ou éducatif au danger » [102].

Les MIE ne doivent pas être exclut de la catégorie d'enfants « en danger » par argument que l'enfance en danger « traditionnelle » sont les mineurs maltraités, ou en rupture familiale ou les délinquants.

Cependant, les débats concernant ces mineurs animent l'actualité. Ils portent sur l'éthique et la validité de l'examen de l'AO, l'accès à la scolarité selon leur âge d'arrivée, le lieu d'accueil adapté (foyer, famille d'accueil, hôtel) ou leur devenir après dix-huit ans selon qu'ils sont demandeurs d'asile ou migrants pour raisons matérielles [123].

Autrement vus et classés, l'enquête sociologique de la sociologue Angélina Étiemble, qui a proposé en 2002 une typologie basée sur les causes du départ des mineurs, identifie aux MIE six grands types de parcours [92, 122] :

- Les exilés, qui fuient des régions en proie à la guerre, aux violences politiques et aux conflits ethniques ;
- Les mandatés, envoyés en Europe par leur famille afin de travailler, de poursuivre des études et d'envoyer de l'argent ;
- Les exploités, enfants et adolescents victimes de trafics divers ;
- Les fugueurs, en fuite de leur domicile familial ou institutionnel habituel, en raison de situations de conflit ou de maltraitance ;
- Les errants, déjà en situation de précarité dans leur pays, qui tentent leur chance dans un pays riche ;
- Les rejoignants, qui, partant retrouver un membre plus ou moins éloigné de leur famille, seront isolés et en danger du fait des conditions d'accueil et/ou des hasards de leur parcours.

Parfois, le MIE est dépourvu de documents d'identités faisant foi de sa minorité (-18 ans), le Juge des mineurs lui demande de réaliser un acte de détermination d'âge physiologique (expertise d'âge osseux) avec son consentement afin de garantir sa protection [105] et reconstruire son état civil qui régularise et justifie son séjour [58]. Un MIE en situation irrégulière est un individu relevant de la catégorie des personnes les plus vulnérables de la société [105].

L'accompagnement dans le cadre de la reconstitution de l'état civil se fait tout au long de la prise en charge de ces mineurs. Mais les pratiques consulaires diffèrent d'un état à l'autre. Certains consulats refusent de délivrer tout document d'état civil pour les personnes mineures en l'absence de représentant légal. Si la reconstitution de l'état civil des jeunes est problématique voire impossible par le biais des autorités consulaires, il est possible de saisir, à cette fin, les autorités judiciaires nationales [58].

Les articles 7 et 8 de la Convention internationale relative aux droits de l'enfant étaient claires à ce sujet et prévoient que chaque enfant « a le droit à un nom, le droit d'acquérir une nationalité » et que « si un enfant est illégalement privé des éléments constitutifs de son identité ou de certains d'entre eux », les états « doivent lui accorder une assistance et une protection appropriées, pour que son identité soit rétablie aussi rapidement que possible » [146].

En conclusion, et pour mener des enquêtes sur des enfants et des adolescents isolés et/ou étrangers dans le territoire ou au niveau des frontières et aéroports, voici quelques recommandations qui devraient être en vigueur :

- L'évaluation de la minorité et de l'isolement est indispensable pour bénéficier du dispositif de protection de l'enfance, conformément aux engagements internationaux du pays.
- Les procédures d'évaluations se doivent être homogènes sur l'ensemble du pays, de même qualité, garantissant les mêmes droits aux mineurs, qui se présentent comme MIE, et fiable. Aucun mineur isolé ne doit être laissé sans protection, de même qu'aucun majeur ne doit bénéficier du système de protection de l'enfance.
- Dès qu'un jeune étranger se prétend mineur, une évaluation de sa minorité devrait être entreprise rapidement afin de limiter au maximum la période de détention. Le droit à la contre-expertise doit être reconnu et aménagé en sorte de le rendre effectif et efficace, dans le respect du principe du contradictoire [86].

  Ces jeunes sont systématiquement soumis à une expertise (ou test) dite osseuse [86, 92], afin de déterminer leur AR et cela malgré les documents d'état civil que peuvent détenir certains d'entre eux, elle comporte un examen radiologique du poignet gauche, même aussi du bassin visant à déterminer leur développement osseux [92]. L'expertise médico-légale ne se limite pas seulement à l'examen osseux, elle est parfois complétée

par un examen de sa dentition et du développement de ses organes sexuels et du développement pubertaire, en procédant à un examen de pilosité et des organes génitaux qui consiste, pour les jeunes garçons, à mesurer leurs testicules ou pour les filles à subir des examens de puberté (examen de l'aréole des seins, les poils des aisselles, les poils pubiens, etc.) [92].

Le problème se pose souvent en urgence lors d'une interpellation, ou d'un séjour en zone d'attente des aéroports, lorsque ces enfants et adolescents ne peuvent ni présenter aux autorités de documents d'identité fiables ni fournir de dossier médical, même succinct, aux médecins chargés de les examiner [52].

- Disposer d'un temps d'examen correct, et non toujours dans l'urgence [53, 54].
- Un interprète doit être présent. En effet, aucun examen médical (inspection, mensurations, radiographies) ne sera pratiqué par un médecin sans l'accord de l'intéressé. Aucun critère ne peut être relevé par un médecin sous la contrainte [53, 54].
- Disposer d'un laboratoire pouvant pratiquer en urgence un test de grossesse pour compléter éventuellement l'examen d'une jeune fille dont l'âge présumé se situe entre 13 et 16 ans [53], avant de faire pratiquer un examen radiologique [54]. un examen gynécologique est obligatoire
- S'il s'agit de délinquants, il faut connaître les différents alias sous lesquels cet étranger a pu déjà être présenté à l'hôpital. Il n'est pas rare en effet de revoir de nombreuses fois le même sujet sous des noms différents. L'examen pourra alors être comparatif aux précédents, diminuant ainsi les causes d'erreurs [53, 54].
- Il est nécessaire pour le médecin de recueillir des informations auprès des personnes qui ont pris en charge le mineur depuis son arrivée sur le territoire s'il s'agit d'un demandeur d'asile [53, 54].
- En pratique, tous les mineurs isolés sont de fait assimilés à des délinquants lorsqu'ils sont conduits pour examen dans les services hospitaliers par les forces de police. Il apparaît indispensable que certaines conditions d'examen soient respectées [53, 54].
- Une sensibilisation accrue des services de «première intervention» auprès des mineurs devrait être initiée afin d'éviter toute conséquence négative à leur égard [86].

d. <u>Détermination de l'âge d'un mineur délinquant :</u>

L'« enfant délinquant » dans la législation algérienne est celui « qui commet un fait incriminé et dont l'âge ne peut être inférieur à dix (10) ans, le jour de la commission de l'infraction » [102].

L'âge d'un mineur « délinquant » ayant commis un délit doit être rapidement fixé afin d'orienter la procédure devant le Juge des mineurs [53, 54], cette détermination oriente vers les juridictions spécialisées et guide la juridiction compétente [62].

La pratique démontre que les tribunaux sont souvent confrontés au problème de la détermination de l'âge d'un délinquant mineur lorsque ce dernier est d'origine étrangère. En effet, dépourvu de documents d'identité ou de séjour, le jeune est bien en mal de démontrer son identité ou de prouver son âge. La spécificité de ce type de délinquance amène souvent les autorités judiciaires à adopter une attitude de méfiance voire de non prise en considération des dires d'un jeune étranger. Le recours à une « expertise médicale », prenant en compte les analyses osseuses et dentaires, devient l'automatisme afin de vérifier la compétence des autorités répressives [86].

C'est le médecin qui déterminera les tranches d'âge qui seront tenues et traduites dans des décisions judiciaires : inférieure à 13 ans et supérieure à 13 ans, inférieure à 16 ans et supérieure à 16 ans, inférieure à 18 ans et supérieure à 18 ans [53, 54]. En effet, le droit algérien, contrairement au droit français, distingue trois situations en fonction de l'âge du mineur dont la responsabilité dépend directement de ces seuils [153], et dont les décisions judiciaires se tracent selon ces tranches d'âge.

Bien que, et à l'instar de la plupart des législations des pays européens, le droit algérien, qui s'inspire largement du droit français, ne retient la responsabilité pénale des mineurs qu'à titre exceptionnel, faisant de l'irresponsabilité du mineur le principe de base, et cela par référence à l'absence présumée de raison (limitée à l'âge de 10-13 ans) et de discernement (concerne l'âge de 13-16 ans) chez le mineur [153].

e. <u>Autres intérêts médico-légaux :</u>

En plus des cas médico-légaux et juridiques cités plus haut et dont la détermination de l'âge osseux s'avère indispensable, deux autres cas particuliers dans notre pays et ailleurs aussi, moins fréquents, mais nécessitent le même recours juridique à l'expertise médicale à la recherche de l'AO.

- <u>Lors d'un mariage présumé précoce :</u>

  Le mariage précoce présente de profonds effets sur le plan physique, intellectuel, psychologique et émotionnel, et met fin aux possibilités d'éducation et de croissance individuelles [147].

  Une des mesures prise par l'Algérie pour répondre à la protection des droits de l'homme et des mineurs, a été de relever l'âge du mariage [5]. Le législateur algérien dans l'article 7 du code de la famille, affirme que « la capacité de mariage est réputée valide à 19 ans révolus pour l'homme et la femme » [103]. Mais cet article pose aussi la question de savoir s'il y a un âge au-dessous duquel il n'est pas possible d'accorder une dispense en vue

du mariage [5]. En Algérie, l'âge légal le plus bas en matière d'aptitude mentale est l'âge de discernement fixé par le code civil à treize (13) ans (Art. 42) [114].

La question est comment le juge peut-il apprécier la maturité de la future ou des futurs mariés mineurs ? L'idée, selon laquelle un enfant est apte au mariage dès lors qu'il a atteint la maturité, est erronée car l'enfant n'a pas terminé son développement [5].

La situation est quelquefois compliquée quand les naissances sont enregistrées de façon si irrégulière qu'on ignore souvent l'âge des personnes, de même, de nombreux mariages en outre peuvent ne pas non plus être enregistrés, et sans certificat de naissance un enfant ne peut se défendre contre la violation de droits en relation avec l'âge. Dans les pays où la loi sur l'âge minimum du mariage est méconnue, la carence des systèmes d'enregistrement des naissances renforce le mariage précoce [147].

- <u>La régularisation de la situation des enfants non enregistrés à l'état civil :</u>

  L'enregistrement des naissances est le fait d'inscrire dans un registre d'état civil, de manière continue, permanente et universelle, les naissances et les informations en rapport, conformément aux prescriptions juridiques nationales en vigueur. L'Unicef va beaucoup plus loin et considère que « l'enregistrement des naissances est un passeport pour la protection des droits de chaque enfant », surtout les droits socio-économiques (le droit à la santé et le droit à l'éducation) qui se trouvent particulièrement menacés lorsque l'enregistrement des naissances n'est pas fait de manière systématique [15].

  L'état civil permet alors d'officialiser l'identité d'une personne et demeure un outil indispensable permettant d'exercer ses droits humains les plus légitimes. Donc, les enfants qui ne sont pas déclarés à la naissance n'existent pas juridiquement, on parle ainsi des « enfants sans identités juridiques »[1] ou des « enfants invisibles » ou même des « enfants fantômes » [15].

[1] Par identité juridique on entend les caractéristiques de base constituant l'identité d'une personne, telles que le nom, le sexe et le lieu et la date de naissance, conférées après la naissance lorsqu'une autorité d'état civil enregistre la naissance et délivre l'acte qui l'atteste. Si la naissance n'a pas été enregistrée, l'identité juridique peut être conférée par une autorité habilitée à le faire [111].

III.4. Deux autres intérêts de l'estimation de la maturation squelettique : L'école et Le sport

Mise à part les intérêts précédemment cités, l' « âge osseux » trouve son importance dans deux autres domaines très intéressants, très « populaires », et très « demandés », ce sont les domaines Scolaire et Sportif :

1. A L'école : [137, 139]

Dans l'approche de la signification pédiatrique de la maturation squelettique, l'étude de la maturation squelettique doit intervenir dans toute argumentation destinée à apprécier en particulier les performances scolaires d'un enfant ou d'un adolescent. Les phases de cette maturation physique et psychique sont trop fondamentales, elles sont trop inhérentes à la structuration de la personnalité, trop « constitutionnelles » en fait pour être négligées tant soit peu.

Il ne s'agit pas de juger un écolier sur des radiographies du poignet ou de la main (ou du coude), mais de savoir que leur simple examen apporte une donnée objective, une précision autre que statique, un élément de pronostic. S'en priver serait non seulement une erreur, mais peut-être plus encore un témoignage détestable de mépris envers ce langage biologique que l'enfant et l'adolescent nous adresse au jour le jour et avec tant d'avidité de dialogue.

La maturation osseuse n'est que le reflet, mais reflet privilégié de la relation structurelle que l'enfant et l'adolescent construisent face à eux-mêmes et face au monde extérieur. Sans hypertrophier la place qui lui revient, il est certain que l'adulte, dans sa fonction éminente d'éducateur, se doit d'y songer et ne peut manquer d'y avoir recours.

Transcrite en termes dynamiques, la maturation osseuse permet une meilleure et plus fructueuse approche de la définition de l'harmonie que l'on espère voir présider à la croissance et au développement.

Orientée dans le sens de corrélations multiples, son analyse a certainement une valeur « interdisciplinaire » et doit permettre à tout homme et femme d'agir au mieux pour ses descendants, qu'ils soient bien portants ou malades.

Recueilli avec attention, son message outrepasse donc le squelette pour atteindre au vivant : c'est, à notre avis, ce qui lui donne sa valeur.

Bref, en Médecine Scolaire, le recours aux radiographies du poignet, de la main et spécialement du coude (de face et de profil) est préconisé chaque fois qu'un problème d'inadaptation se pose : il est extrêmement aisé de démontrer l'évidence d'un retard relatif du passage de l'enfance à l'adolescence et, fort de ce discours du sujet concerné, il est toujours apparu excellent de dédramatiser ainsi la situation de pseudo-échec.

2. Au sport :

La maturation squelettique dans le domaine du sport est utile dans deux volets :

a. Le volet de l'entraînement sportif :

La pratique du sport chez l'enfant ou l'adolescent est de façon générale conseillée pour leur santé et leur épanouissement physique et psychologique [98].

Les bénéfices de l'activité physique sont nombreux et sur plusieurs plans : clinique (développement musculaire, réduction de la masse grasse, impact cardiovasculaire et osseux), psychologique et social (prévention des addictions). Ces bénéfices dépendent de l'intensité, de la durée et du type de l'activité sportive. A l'inverse, des entraînements très intensifs (Au-delà de 20 heures d'entraînement par semaine) avec contrôle excessif de la silhouette et des apports nutritionnels dans la période de l'enfance et de l'adolescence, peut engendrer des effets délétères sur la croissance (retard de taille), le développement osseux (retard de l'AO), le métabolisme et le développement pubertaire (retard pubertaire), mais aussi : les anomalies du cycle menstruel, les perturbations endocriniennes multiples et la fréquence des blessures musculo-tendino-ostéo-articulaires.

Ces risques sont particulièrement à craindre dans les sports dits à silhouette ou d'apparence (gymnastique, danse, patinage artistique et natation synchronisée) pour lesquels la performance est favorisée par la petite taille ou le faible poids. D'autres sports sont également concernés tels le tennis, les sports d'endurance (courses de fond et sports à catégories de poids) [98].

Il s'agit en fait, d'un haut niveau de dépense énergétique qui s'associe souvent à une limitation voire un déficit des apports nutritionnels (inférieurs à 1000 kcal/jour avec moins de 12 à 15 % de lipides) [98].

Si les garçons pratiquant le sport de haut niveau ont des contraintes identiques que les filles, les conséquences en termes de retard de croissance et de puberté ne semblent pas aussi fréquentes, probablement protégés par des conduites alimentaires moins restrictives que chez les filles. De plus la période maximale d'entrainement des gymnastes masculins coïncide avec la fin de puberté, alors que chez les filles elle a lieu pendant le développement pubertaire [98].

L'encadrement médical de ces enfants et adolescents pratiquants des entrainements sportifs est primordial, il doit être pris en charge par des médecins spécialisés et adaptés pour ces enfants et adolescents. Le suivi médical doit impérativement intervenir par un suivi nutritionnel rigoureux (calorique, protidique, vitaminique), un examen gynécologique et des bilans réguliers et répétés, bi-annuels, biologiques, hormonaux et osseux à la recherche des troubles de la croissance staturale (détermination de l'AO) et pondérale (calcul de l'indice de masse corporelle) mais aussi de la puberté pour prévenir ou traiter au mieux les carences et les lésions musculaires osseuses ou articulaires [98].

Par ailleurs, dans plusieurs sports, la performance des athlètes adolescents est déterminée par leur maturité physique, ainsi que leurs âges [143].

Il a été suggéré que l'âge, l'expérience, la taille et le stade de la puberté contribuent considérablement, selon différentes combinaisons, aux certaines compétences de footballeurs telles que dribbler avec une passe, un contrôle du ballon avec le corps et précision de tir [59, 129].

C'est l'AO qui détermine l'âge physiologique de l'enfant et c'est donc lui qui doit être pris en compte pour déterminer la classe d'âge de pratique sportive [16].

Le moment et le rythme de la croissance sont très individuels et asynchrone avec l'âge décimal pendant l'adolescence chez les joueurs de football subissant une phase de croissance accélérée (environ 7,5 à 9,7 cm/an) entre 10,7 et 15,2 ans. Ce rythme amélioré de la croissance est communément appelé « la vitesse de la taille maximale » (VTM). Le moment du début de la VTM est pertinent pour les joueurs de football pratiquants, étant donné que des améliorations temporaires, liées à la maturité, des caractéristiques anthropométriques et de la forme physique se sont avérées significatives pour confondre les processus de sélection employés par les académies de football [143].

Les dimensions anthropométriques (taille et poids) et les paramètres de performance (puissance, vitesse, force et endurance) contribuent souvent à une erreur faite lors de la sélection des sujets à étudier (biais de sélection de maturité)[1], qui se caractérise par une sursélection des joueurs à maturité précoce retenus par les programmes de développement de football de l'académie [143]. C'est pour cette raison qu'une demande de surclassement ne devrait être acceptée qu'en fonction de l'AO et non de l'AS ou de l'AR [16].

Certains enfants présentent un retard simple de la croissance et de la puberté avec AO = AS < AR. Le problème se pose à l'âge du début présumé de la puberté. Vers 12-13 ans d'AR chez la fille et 13-15 ans d'AR chez le garçon, ces mêmes enfants ne sont pas pubères ; ils ont une taille, une morphologie et un potentiel musculaire inférieurs à ceux de leurs camarades, qui ont une maturation pubertaire en rapport avec leur AR. Ils devraient, en fait, être sous-classés dans leur catégorie d'AO [16].

À l'opposé, un garçon de 13 ans ou une fille de 11 ans, grands pour leur âge et pubères depuis deux ans auront un potentiel musculaire de 15 ans pour le garçon et de 13 ans chez la fille. Ils pourront, de façon évidente, être surclassés [16].

Pendant le sport, la pathologie de sur-sollicitation sera préférentiellement une pathologie du cartilage de croissance, qu'il s'agisse de traumatismes aigues ou de microtraumatismes chroniques [16].

[1] Dans une étude statistique, le terme « biais de sélection » désigne une erreur systématique faite lors de la sélection des sujets à étudier. Ce terme regroupe tous les biais pouvant conduire à ce que les sujets effectivement observés lors d'une enquête ne constituent pas un groupe représentatif des populations censées être étudiées et ne permettent donc pas de répondre aux questions posées dans le protocole (https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_de_s%C3%A9lection)

Bref, en Médecine Sportive, la surveillance expérimentale des jeunes adolescents se soumettant aux entraînements parfois intensifs des Sections Sports-Etudes fait l'objet de recherches à partir d'études séquentielles individuelles pour la pratique d'un sport donné : analyser soigneusement le déroulement de la maturation squelettique de ces sujets est assurément le moyen le moins onéreux d'éviter des emballements toujours menaçants chez ces « juniors » enthousiastes [137].

b. Le volet des compétitions :

La détermination précise de l'âge des participants est importante dans tout sport de compétition soumis à restriction d'âge. Cependant, les incohérences d'âge conduisent à des chances inégales et nuisent à la fois l'esprit du jeu et les règles de la pratique sportive [59, 129], puisqu'il arrive que des joueurs, ayant dépassé la limite d'âge, participent à diverses compétitions juniors de la FIFA, bénéficiant souvent d'un avantage injuste par leur plus grande maturité physique par rapport aux joueurs de la tranche d'âge concernée [59, 65]. Ces joueurs avec un âge relativement plus élevé sont plus susceptibles d'être identifié comme « talentueux » en raison des avantages physiques qu'ils ont par rapport à leurs pairs "plus jeunes" [59, 129].

La raison est que le principal moyen de vérification de l'âge d'un joueur consistait à contrôler la date de naissance présentée sur son passeport. Cette méthode ne s'avère pas toujours suffisante et il y a même dans certains pays, les certificats de naissance sont imprécis voire inexistants [59, 65], étant donné que l'enregistrement à la naissance n'est pas obligatoire dans de nombreux pays africains et asiatiques [59, 129].

Pour faire face à ce problème, la FIFA a décidé de recourir à l'IRM du poignet lors de la Coupe du Monde U-17, en examinant au Nigeria des joueurs choisis de manière aléatoire sous la supervision d'experts médicaux de la FIFA [65].

La détermination « radiographique » de la maturité squelettique a une place importante en pédiatrie [59, 65, 129], notamment en ce qui concerne les problèmes endocrinologiques et les troubles de la croissance [59, 129], mais aussi en médecine légale pour déterminer l'AO devant les tribunaux [59, 65], l'utilisation du rayonnement limité est basée sur une ordonnance du tribunal par un juge qui autorise cette pratique [59]. C'est depuis plusieurs dizaines d'années, grâce au rayon X, l'analyse des images du cartilage de croissance est pratiquée pour déterminer l'âge, étant donné que les cartilages de croissance des os du squelette humain sont ouverts pendant la croissance et s'ossifient à différents stades en fonction de l'âge et de la maturité [65]. Aujourd'hui, les radiographies standards du poignet gauche sont largement utilisées pour l'évaluation de l'âge squelettique [129], toutefois, pour des raisons d'éthique liées à l'exposition aux radiations, l'utilisation des rayons X pour déterminer l'âge des footballeurs est non autorisée [59, 65, 129].

Pour résoudre le problème d'identification de l'âge, le F-MARC (FIFA Medical and Research Centre), une des commissions spécialisées de la FIFA, présidé par le Professeur Jiri Dvorak, a développé une nouvelle méthode utilisant l'IRM du poignet pour déterminer l'âge squelettique [65]. Le F-MARC a réalisé une IRM des poignets de cinq cents footballeurs de diverses origines (Suisse, Malaisie, Algérie, Argentine et Sénégal) [59, 65], tous âgés de 14 à 19 ans et munis de certificats de naissance attestés, puis a défini un système de notation sur six points pour l'ossification du cartilage de croissance [59, 64, 65].

Tableau 30 : Nombre de participants dans les différents groupes d'âge, et leurs pays [59]

	14 years	15 years	16 years	17 years	18 years	19 years	Total
Algeria	2	36	36	28	15	3	120
Argentina	17	29	35	30	27	0	138
Malaysia	1	33	28	30	19	16	127
Switzerland	1	27	31	27	24	1	111
Total	21	125	130	115	85	20	496

Il a été démontré que, dans une population normale, il est très improbable que l'ossification complète survienne avant l'âge de 17 ans, c'est-à-dire, il n'y avait personne de moins de 17 ans qui avait un cartilage fermé [64, 65]. En fait, la probabilité de la fusion complète avant l'âge de 17 ans est inférieure à 1 %, autrement dit, si l'IRM montre l'ossification complète du poignet d'un joueur, il y a 99 % de certitude que le joueur ait plus de 17 ans [65, 129]. Cette découverte scientifique officialisée en 2006, a pu déterminer que le cartilage de l'épiphyse distale du radius, au niveau du poignet, se fermait aux alentours de 17 ans pour les hommes [64]. Cependant, cette étude n'a pas inclus le noir Africains [129].
Dans les compétitions FIFA U17, les joueurs doivent avoir moins de 17 ans avant l'année du tournoi, mais ils peuvent être âgés de 17 ans au début du championnat du faite de la variabilité biologique où l'âge "véritable" d'un individu ne peut être estimé qu'avec une certaine probabilité [129].
L'IRM du poignet a montré être une méthode simple, fiable, valide, pertinente et non invasive [59, 65, 129] pour estimer l'âge des jeunes footballeurs de 14 à 19 ans dans une population normative [65, 129], en plus, elle n'expose pas les joueurs à des radiations et offre des images détaillées et un meilleur contraste entre les différents tissus du corps que tous les autres systèmes utilisés en radiologie [59, 65].
Pour la mise en pratique, le F-MARC a ainsi examiné par IRM le poignet de joueurs choisis de manière aléatoire lors des Coupes du Monde U-17 de la FIFA 2003, 2005 et 2007. Les résultats ont été saisissants puisque le taux d'ossification constaté chez les joueurs était beaucoup plus élevé, jusqu'à 35 % de plus, que celui de la population de référence.

Tableau 31 : Critères de classification pour ossification/fusion de l'épiphyse distale du radius par IRM [59]

- Grade I: Completely unfused
- Grade II: Early fusion: minimal hyperintensity within the physis
- Grade III: Trabecular fusion of <50% of the radial cross-sectional area
- Grade IV: Trabecular fusion of >50% of the radial cross-sectional area
- Grade V: Residual physis, <5 mm on any one section
- Grade VI: Completely fused

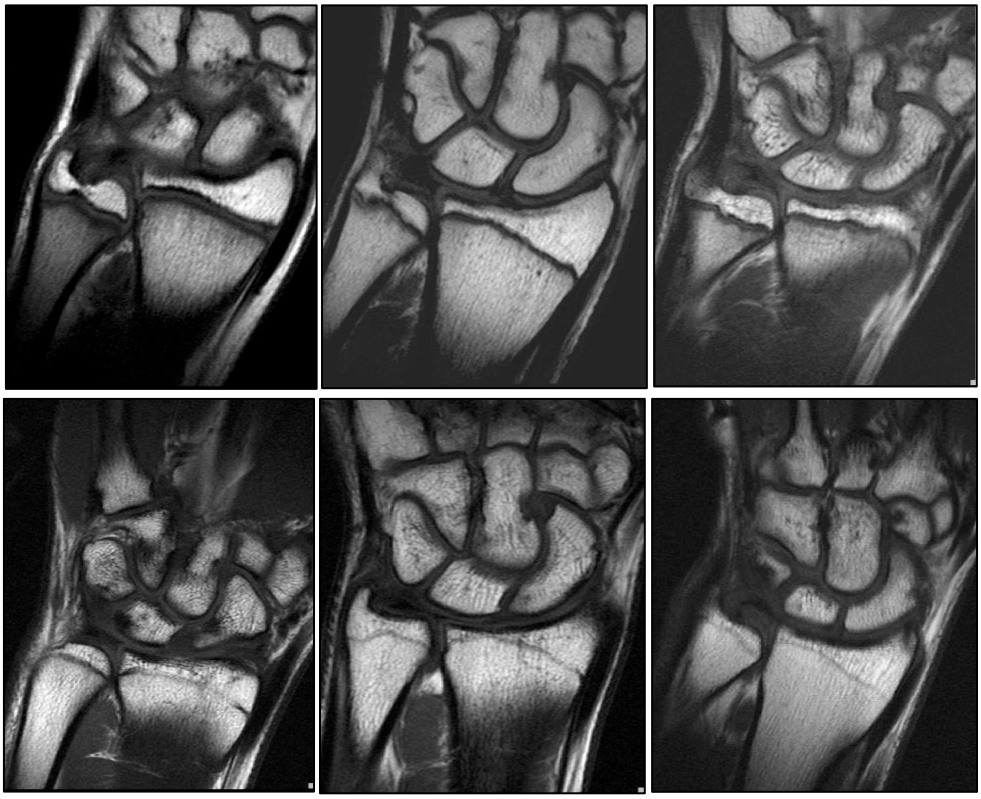


Figure 92 : Classification IRM de l'ossification/la fusion de l'épiphyse distale du radius [59]
De la gauche vers la droite, et du haut vers le bas :
Grade I - non fusion complète de l'épiphyse distale du radius gauche ; Grade II - première fusion de l'épiphyse distale du radius gauche ; Grade III - fusion de moins de 50 % de l'épiphyse distale du radius gauche ; Grade IV - fusion de plus de 50 % de l'épiphyse distale du radius gauche ; Grade V - fusion résiduelle de moins de 5 mm de l'épiphyse distale du radius gauche ; Grade VI - fusion complète de l'épiphyse distale du radius gauche

Depuis, dans les compétitions de la FIFA, l'instance dirigeante du football mondial encourage et soutient les fédérations participantes à réaliser leurs propres examens par IRM, qui ne sont pas encore obligatoires, avant le tournoi [65, 129]. Ces examens permettent aux fédérations de s'assurer de l'âge de leurs joueurs afin de respecter la limite d'âge dans les compétitions [65].

III.5. Limites de la précision et de la fiabilité de l'âge osseux appliqué à des fins médicale et médico-légale

La détermination de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent reste, en l'état des connaissances et des techniques actuelles, une procédure qui présente souvent des difficultés d'estimation et comporte une part importante d'imprécision [23, 24, 35, 52], voire d'erreurs, qui en limitent l'utilisation [23, 24].

En effet, plusieurs méthodes conçues pour évaluer l'AO des enfants et des adolescents sont unanimement contestées au regard de leur manque de fiabilité [21, 54, 92], depuis un certain nombre d'année déjà, il est d'ailleurs scientifiquement établi qu'aucune d'entre elles ne permettent de « déterminer » un AC [21], et même les médecins, notamment pédiatres et radiologues, savent que leurs outils actuels sont imprécis et qu'aucun argument médical ne permettra d'établir une différence formelle entre un mineur de 17 ans, 11 mois et 30 jours et le majeur qu'il devient en quelques instants [81].

En fait, l'AO est calculé pour évaluer le développement physique d'un enfant, normal ou non, et non pour déterminer un AC [35].

Il n'y a pas de bon âge, selon Sempé. Pour lui, sur une radiographie du coude par exemple, certains faits caractéristiques comme la survenue des premières menstruations sont beaucoup plus liés à la proche terminaison de la maturation du coude qu'au simple AC. En fait, « On voit bien qu'il ne saurait s'agir d'un « âge » défini, même si, dans nos contrées, cet « âge » peut être proposé, en tant que médiane, aux environs de quatorze ans chez les jeunes femmes et de seize ans six mois chez les jeunes hommes : encore faut-il ajouter immédiatement au résultat obtenu : plus ou moins vingt-quatre à trente mois pour le sexe féminin et plus ou moins trente à trente-six mois dans le sexe masculin !! » [135].

D'ailleurs, la mise en évidence scientifique du caractère peu fiable de ces expertises osseuses en tant que technique de détermination de l'âge d'une personne, fait qu'aujourd'hui, elles sont abandonnées par un certain nombre de pays comme le Royaume-Uni, la Suisse, la Belgique ; la France quant à elle persiste à y recourir, avec l'aval de la plus haute juridiction française [21]. En Allemagne, l'examen radiographique n'est pas considéré comme devant être imposé à des sujets de plus de 14 ans, quitte à ce que l'individu le réclame de lui même s'il conteste les conclusions de l'enquête [54].

Et donc, l'AO, en tant que critère d'évaluation de la maturation squelettique, et de la croissance, reste cependant approximatif et n'est pas exempt de critiques, puisque l'ordre d'apparition des points d'ossification n'est pas constant, des différences

peuvent se voir d'un hémisquelette à l'autre, et des retards d'AO d'un à deux ans sont parfois observés chez des enfants dont la croissance staturale est normale [32].
Au total, l'évaluation de la maturation squelettique n'est pas une science exacte, plusieurs auteurs avancent leurs réserves en se basant sur beaucoup de faits de carence quant à sa « précision », sa « fiabilité » et sa « certitude d'analyse » pour déterminer un « AO » pertinent. Ils s'expriment en tenant à cinq arguments principaux :

1. **Les variabilités individuelles :**

   L'évaluation de la maturation osseuse se heurte à la variabilité individuelle [34, 35], et l'hétérogénéité humaine est telle, dans le temps et l'espace, qu'il est vain de penser que d'ici longtemps il sera possible de déterminer, sans connaissance de sa date de naissance, l'AC exact, à un moment donné, d'une personne [52].

   Les différences individuelles, quant au genre des personnes, leurs origines ethniques, leurs races, leurs origines et lieux géographiques, leur alimentation, leurs statuts socio-économiques et autres [3, 21, 66], ne permettent que d'obtenir une estimation de l'AC, à 18 mois près dans le meilleur des cas [21].

   En effet, La procédure d'estimation de l'âge actuelle ne prend pas en compte les origines ethniques des jeunes. La littérature scientifique regroupe de nombreuses études indiquant qu'il y a des différences notables en la matière, avec par exemple, une surestimation de 3 années de l'âge des filles et des garçons en Inde du Sud, et une constatation d'« une maturation osseuse plus rapide avec une structure osseuse plus dense » notamment pour les personnes noires [66].

   Aussi, chacune des méthodes utilisées a tendance à surestimer l'âge des filles de 1 à 2 ans par rapport aux garçons, de même que l'environnement, le climat, les conditions socio-économiques et l'alimentation ont également un impact sur la maturation osseuse et dentaire, ce dont l'examen d'estimation de l'âge doit par conséquent tenir compte [66].

   Par ailleurs, l'état de santé de la personne peut mener à une variation de l'AO par rapport à la norme [48]. En effet, la régulation hormonale peut avoir un impact important sur la croissance et peut entrainer un retard ou une accélération pubertaire, menant à son tour à sous-estimer ou surestimer l'AC. Par exemple, en cas d'insuffisance gonadique, un retard apparait et l'AO devient inférieur à l'AR ; au contraire une hypersécrétion d'androgène donne aux os un âge supérieur à l'AR [66].

   Il est donc important que l'impact de tous ces éléments sur l'estimation de l'AO soit analysé [66], et qu'une appréciation de l'AO doive se faire après une investigation additionnelle de l'état de santé de la personne, notamment en ce qui concerne de possibles anomalies hormonales [48].

Malgré ça, plusieurs méthodes ne prennent pas en compte l'origine ethnique, les habitudes nutritionnelles et les autres facteurs individuels ce qui fausse évidemment grandement les résultats qui peuvent être obtenus [86].

Un exemple de la méthode de Greulich et Pyle (GP) : la variabilité individuelle (déviation standard) de l'AO déterminée par cette méthode chez un jeune homme de 17 ans est d'environ 13 mois. Si l'on considère un intervalle de 2 DS, ce qui est d'ordinaire la règle pour les variantes de la norme en médecine, il s'ensuit un intervalle de plus de 2 ans. Un jeune homme de 17 ans normal et en bonne santé peut donc présenter un AO de 19 ans. Dans le cas de requérants d'asile sans AC documenté, cette méthode ne peut donc donner qu'une estimation grossière de l'âge biologique [48].

D'autre part, la table Greulich est basée sur une étude faite à la Stanford University de Californie sur une population californienne ; la table de Tanner est réalisée à l'Université de Londres sur un échantillonnage britannique. Or, on sait que la maturation osseuse varie avec les races et les régions ; la maturation osseuse est plus précoce chez les enfants de race africaine ; de la sorte un AO estimé à 18 ans chez un Guinéen en se basant sur une radio du poignet correspond très vraisemblablement à un AR nettement moindre. C'est difficile de transposer la maturation d'enfants caucasiens à des enfants de race noire [88].

En effet, les différents critères radiologiques relevés sur un patient ne sont jamais comparés avec une population de référence appartenant à la même ethnie étrangère actuelle. Il en résulte que les critères radiologiques relevés sont «mauvais scientifiquement» surtout entre 15 ans et 18 ans, les méthodes d'évaluation de l'AO ne prennent pas en compte les réelles différences de croissance et de maturation osseuse liées à l'origine ethnique et aux carences nutritionnelles dont souffrent bien souvent des individus. L'estimation ne peut donc être transposée qu'avec un certain facteur d'imprécision [86].

La question de l'impact de l'origine ethnique et des autres facteurs de variabilités individuelles sur la fiabilité des différents tests osseux doit être beaucoup plus investiguée et doit être inclue dans la procédure actuelle d'estimation de l'âge. Il faut en tenir compte quand on estime l'âge [66].

2. Le conflit de spécificités entre le « Médical » et le « Juridique » :

Les méthodes d'estimation d'AO ont été créées dans un but médical et statistique et nullement dans un but juridique et individuel [36], et la finalité initiale des radiographies de la main et poignet gauches n'a jamais été juridique mais purement médicale, afin que le risque d'une intervention médicamenteuse, l'utilisation de traitements hormonaux par exemple, gênant la croissance, soit pris en compte avant un traitement. L'utilisation qui en est faite par la transformation d'une donnée collective et relative à une finalité médicale en une vérité singulière à finalité juridique ne peut être que très

préoccupante [52]. L'utilisation à des fins médico-légales de l'AO est très controversée donc, et pose des problèmes d'ordre éthique graves [3].
La question qui résume « le conflit de spécificités » est la suivante : peut-on se fier à des critères scientifiques qui ont une utilité et des objectifs purement médicaux, totalement indépendants de l'AC pour déterminer juridiquement un statut de mineur, lorsque des éléments d'identification sociale fiables manquent ? [52]
Précisons d'abord que les différentes méthodes d'évaluation de la maturation osseuse ont été établies dans un but de diagnostic médical afin de déceler différentes pathologies telles les retards de croissance, et non spécifiquement pour déterminer l'âge d'un individu [53].
Il apparaît qu'à la différence de ce qui prévaut pour le médecin pour lequel l'intérêt de l'examen osseux réside en premier lieu dans la mise à disposition de données fiables pour prévoir la croissance d'une personne : il a alors connaissance de l'AC et le compare aux valeurs moyennes d'AO. En contrepartie, ce qui intéresse en priorité les praticiens du droit est de procéder au raisonnement inverse, c'est-à-dire d'établir un AC en fonction d'un AO. Or, en procédant à cette démarche, il est indispensable de pondérer le résultat en tenant compte de la grande variation possible à l'intérieur d'une classe d'âge [86].
La gravité des conséquences dans un sens ou dans un autre, qu'elles bénéficient ou non à la personne, ne va pas de pair avec le flou des critères. La médecine utilise en effet ces critères non pas pour déterminer l'AC, mais pour apprécier l'âge biologique dans un contexte médical où seul l'âge « biologique » compte. Cette discordance entre AR et âge biologique est accrue par l'existence de plus d'un demi-siècle de changements morphologiques qui ont évolué de façon hétérogène selon les pays. Pour l'utilisation sans discernement de paramètres scientifiques à des fins juridiques, on ne peut répondre que par la négative. Ces paramètres comportent en effet une part d'imprécision mal évaluée. Cette incertitude ne signifie pas qu'il faille renoncer à l'expertise en tant que telle, dans la mesure où la loi exige qu'elle soit diligentée, mais impose d'y avoir recours dans des conditions et des principes qui relativisent d'emblée la portée des conclusions [52].
Un exemple clair qui illustre ce « conflit de spécificités » entre l'intérêt médical et l'intérêt médico-légal des méthodes d'estimation de la maturation squelettique est bien connu pour la méthode de GP [36]. Cette dernière a été établie en 1935 à partir d'une population de race blanche, née aux Etats-Unis, d'origine européenne et de milieu familial aisé, destiné non pas à déterminer avec précision un âge civil (légal) mais à des fins purement médicales pour déceler certaines pathologies, notamment des retards de croissance de l'enfant ou adolescent [53, 54, 92]. Cette méthode d'évaluation comporte, selon les

experts eux-mêmes et les juges, une marge d'erreur qui peut aller de 6 à 18 mois et est contesté par des institutions de médecine, d'éthique, des droits de l'homme et des enfants, ainsi que par des scientifiques [92].

La méthode de GP a fait l'objet de plusieurs publications sur des échantillons variés avec parfois des résultats discordants. La précision de la méthode peut être nécessaire en application clinique, en orthopédie, endocrinologie, etc..., dans le cadre de suivi des enfants malades plus que d'une valeur à un temps donné. Par contre, en application médico-légale, il est nécessaire de bien connaître la précision et les limites des méthodes utilisées [36] : de nombreux médecins sont confrontés au problème de devoir déterminer sur réquisition, l'âge des mineurs requérants d'asile à la demande des autorités en utilisant la méthode de GP [36, 48] et doivent pouvoir donner une estimation et si possible l'ET ou l'IC [36]. Les autorités attendent de cette méthode qu'elle détermine si une personne est âgée de moins de 18 ans [48], car le droit définit les statuts de mineurs selon des âges charnières (10 ans, 13 ans, 16 ans et 18 ans) [36] pour en tirer des conséquences juridiques adaptées à l'âge (mesures de protection ou d'assistance ou de surveillance ou d'éducation, interpellation, garde à vue, emprisonnement, détention provisoire…) [34, 36, 53], et donc un étranger mineur âgé de moins de 18 ans ne peut pas être expulsé et peut, sous certaines conditions, bénéficier d'une régularisation de son séjour sur le territoire abritant [36]. Une fois l'âge de 18 ans est atteint, la majorité est atteinte avec les conséquences que cela implique sur le plan juridique pour le demandeur d'asile [48], c'est pour cette raison, la détermination de l'âge peut être lourde de conséquences [36], en raison d'un nombre accru de cas annoncés pour lesquels une différence de plusieurs années existait entre l'AC et l'âge estimé selon GP [48].

Ainsi, un jeune adolescent de race blanche qui présenterait sur le plan osseux un âge adulte aurait en principe (puisqu'il s'agit d'une valeur moyenne) un AC de 19 ans selon l'atlas GP. Cependant, selon l'étude Ontell, il pourrait avoir, en réalité, un AC de 2 mois inférieur au titre de la différence des valeurs moyennes auxquels il faudrait ajouter 2,4 ans (2 ans et 5 mois) au maximum (correspondant à deux unités d'écart standard de 1,2 an). L'intéressé pourrait donc parfaitement avoir 16 ans et 5 mois tout en connaissant néanmoins un développement osseux normal. Pour un adolescent de race noire dans les mêmes conditions, il faudrait tenir compte d'une différence au niveau des valeurs moyennes de 5 mois et de deux unités d'écart standard, soit 2 ans et 7 mois (deux fois 1,3 an) toujours au titre de l'étude Ontell. L'intéressé pourrait donc avoir 16 ans sans échapper aux 90-95 % des individus qui présentent un développement normal. Il découle de ce qui précède qu'il n'est pas possible, sur la base d'un examen osseux, de dégager des conclusions fiables et précises en ce qui concerne la question de savoir si un individu a réellement atteint l'âge

de la majorité, même si l'intéressé présente un squelette de type adulte. On peut tout au plus affirmer qu'une personne a avancé un AC peu crédible, si l'âge allégué sort du cadre des écarts standard mentionnés ci-dessus [86].

Ce constat est d'ailleurs partagé, à tout le moins dans le résultat, par les autorités britanniques qui ne procèdent pas à des radiographies osseuses en raison du manque de fiabilité des conclusions que l'on peut en tirer, pour eux, il est «inapproprié» d'entreprendre des examens radiographiques en vue de procéder à une évaluation de l'âge [86].

La tendance existe dans les tribunaux français de dénier toute fiabilité à ces examens en relation avec des mineurs africains ou asiatiques [86].

Les autorités allemandes et autrichiennes, ne procèdent pas à de tels examens, dans la mesure où une base légale fait défaut. En fait, l'utilisation des examens radiographiques pour des objectifs non thérapeutiques est strictement interdite par la loi allemande et autrichienne [86].

Les autorités suisses en ce qui les concerne ont cessé l'examen radiographique depuis la décision de la Commission suisse de recours en matière d'asile du 12 septembre 2000 [86].

En conclusion, sur le plan méthodologique, il convient de relever que l'atlas en référence visait en premier lieu à diagnostiquer une maturation précoce ou tardive chez l'enfant dont on connaît l'AC (ce qu'il permet de faire par rapport à la valeur moyenne), mais non pas à attribuer un AC en fonction de l'AO [86].

Sur le plan pratique, il n'est pas possible d'estimer l'AO avec une précision inférieure à un an, et le profil évolutif de l'AO chez un enfant donné est beaucoup plus important que l'estimation de la valeur absolue de l'AO à un moment précis [3]. Les méthodes d'estimation de l'AO actuelles sont des méthodes standards, éprouvées et reconnues pour la détermination de l'âge biologique mais ne sont pas conçues comme des méthodes de détermination de l'AC. Elles n'ont pas été conçue ni prouvée comme fiable dans ce but, et donc elles ne permettent pas de déterminer de façon adéquate si un requérant d'asile est mineur (en dessous de 18 ans) ou adulte [48].

3. L'ancienneté et la nature d'échantillonnage des méthodes d'évaluation :

La plupart des méthodes d'évaluation de la maturation osseuse sont basées sur des références quelquefois anciennes faites sur des échantillons différents d'un pays à un autre, la méthode de GP est un exemple : elle a été éditée vers les années 1950 sur une population caucasienne développée [35]. Un autre exemple, la méthode Tanner et Whitehouse (TW-2 method) : éditée elle aussi dans les années 50 et 60, et établie sur une population anglaise et écossaise de classe moyenne [86].

En fait, les méthodes Greulich et Tanner recèlent un risque d'erreur majeur à l'égard d'enfants non caucasiens, originaires d'Afrique ou d'Asie, dont le

développement osseux peut être tout à fait hétérogène par rapport aux références anglo-saxonnes sus-citées et qui peut être profondément affecté par des carences ou des pathologies inconnues dans les populations de référence remontant à plus d'un demi-siècle [52]. Ceci est dû au manque d'études actualisées des tables envisagées et à l'absence d'études spécifiques menées sur les populations africaines ou asiatiques, ce qui rend ces méthodes contestables. En fait, aucune étude analogue, à la méthode de GP, n'a porté sur les populations africaines ou asiatiques [53, 54]. L'étude la plus récente concerne la population japonaise et laisse clairement apparaître une divergence notable dans les résultats entre la méthode de Tanner et celle de GP qui ne s'explique que par la plus grande rapidité avec laquelle la maturation osseuse est atteinte aujourd'hui que par le passé [86]. Même au sein d'une population dite caucasienne, le développement osseux comporte une grande hétérogénéité, et depuis 50 ans, les signes de maturation osseuse ont évolué en fonction de divers facteurs, en particulier nutritionnels [52].

Et bien qu'il soit bien démontré actuellement que la maturation osseuse d'un enfant ou d'un adolescent s'effectue plus rapidement que par le passé, aucune des abaques n'a été remises aux normes actuelles [86].

Il est particulièrement inquiétant, à une époque où se développe une médecine « fondée sur les preuves », de voir pratiquer, à des fins judiciaires des examens dont la signification et la validité, par rapport à l'objet même de la demande d'expertise, n'ont pas été évalués depuis plus de 50 ans [52].

La détermination de l'AO doit être extrêmement prudente car la radiographie du patient n'est jamais comparée à sa population de référence, et les phénomènes pubertaires interfèrent eux-mêmes avec la maturation osseuse ; à l'adolescence, en particulier dans les deux ans précédant le pic de croissance staturale, l'AO progresse plus rapidement que l'AC [86].

Les tables de GP et celles de Tanner sont théoriquement d'application jusqu'à l'âge de 18 ans. Cependant, dans la réalité d'application à partir de 14 ans, les différences de morphologie des noyaux d'ossification deviennent tellement ténues que la détermination devient très incertaine [88] ; on considère que ces méthodes de détermination de l'AO n'est plus d'application au-delà de 14 à 15 ans [39, 86, 87, 88], ceci limite fortement les possibilités d'utilisation de ces méthodes à l'égard des adolescents [86]. Une autre méthode, celle de Sauvegrain et Nahum basée sur la radiographie du coude est souvent utilisée en complément des méthodes reposant sur la radiographie de la main et du poignet pour estimer l'AO en période péri-pubertaire, cependant ses résultats semblent surestimer la réalité chronologique [36].

Toutes ces imprécisions ont conduit depuis longtemps à recourir à d'autres méthodes d'évaluation : (1) la radiographie panoramique dentaire destinée à examiner le développement de la dentition (ces radiographies ne sont

habituellement destinées qu'à un traitement orthodontique afin de déterminer la possibilité ou non d'une intervention dentaire en fonction de l'état du développement), et (2) l'examen clinique des signes de puberté. Mais ces radiographies et cet examen clinique n'échappent ni l'une ni l'autre aux écueils précédemment évoqués. Non seulement le développement dentaire et la manifestation des signes de puberté sont très hétérogènes selon les personnes, mais des modifications majeures concernant l'âge de leur survenue, liées à divers facteurs environnementaux, rendent de plus en plus aléatoire l'interprétation individuelle et la fixation d'un AC réel [52]. D'ailleurs, les adolescents et adolescentes peuvent être déclarés plus âgés qu'ils ne sont en réalité ou au contraire plus jeunes, par l'examen clinique de la puberté. L'incertitude est même la plus grande entre 15 et 20 ans, âges pour lesquels les examens osseux sont le plus fréquemment demandés. Et donc, qu'elles soient prises isolément ou combinées, ces méthodes n'apportent pas aujourd'hui les informations scientifiques précises qu'impose l'application des textes [52].

4. La subjectivité de la lecture du cliché radiographique :

La lecture de l'AO à partir d'une radiographie du poignet et de la main gauche par comparaison avec les atlas et les planches de schémas de référence, demeure la méthode la plus simple et la plus fiable [4, 39].

Néanmoins, ces méthodes d'évaluation de l'AO, basées sur des Atlas ou des Planches de Schémas, est forcément approximatives et comportent bien des aléas [135], puisqu'il existe une variabilité importante chez les utilisateurs de l'atlas liée à la différence possible d'évaluation de similitude entre un cliché radiographique et une planche de l'atlas [53, 54]. Pour ces aléas, ne serait-ce que ceux du choix des images de référence [86, 135] et de la subjectivité de l'observateur [3, 135]. En effet, la subjectivité de lecture est un problème essentiel tient à la reproductibilité des examens entre différents experts : l'interprétation globale des paramètres osseux, peut varier d'un expert à l'autre, chaque critère définissant une large «tranche d'âge» et non un âge absolu [54].

Inhérent à la lecture de l'AO sur des clichés radiographiques, un autre problème est de règle : la lecture elle-même allonge, quelquefois de façon très importante, le temps de lecture sans apporter un gain significatif de précision [4, 39].

Par ailleurs, on ne peut aussi que s'interroger sur la validité conceptuelle d'un « âge médian » à partir de nombreuses images (le poignet et la main en comptent vingt-deux utiles, le coude sept) [135] !

5. Le manque de qualité du cliché radiographique :

La radiographie doit être de bonne qualité et suffisamment contrastée pour repérer facilement les critères maturatifs [23].

Cependant, il existe une variabilité importante chez les utilisateurs de l'atlas liée à la différence possible d'évaluation des similitudes relevées entre un cliché radiographique et une planche d'atlas, ce qui pose la question de la qualité des images radiographiques concernées [86].

En effet, l'étude de ces clichés radiologiques repose sur l'évaluation des noyaux d'ossification et la persistance ou non des cartilages de croissance au niveau des os longs [53, 54]. La perception de ces critères dégagés dans les différentes méthodes dépend également des constantes de pénétration des rayons X lors de la prise de la radiographie [53, 54, 86].

En outre, un problème qui se pose ici est l'exposition aux rayons X liée à l'acquisition des images radiographiques.

Normalement, le cliché radiographique standard du poignet et de la main gauche permet d'étudier un maximum d'indicateurs avec un minimum d'irradiation [23].

Cependant, lors des tournois de football à limite d'âge préfixée (compétitions des moins de 17 ans, par exemple), l'étude de la maturation osseuse permet une évaluation appropriée de l'âge « réel » pour s'assurer de l'éligibilité du joueur. A la radiographie d'une partie du squelette, qui est comparée à un atlas pré-établi, jugée imprécise et irradiante [56], se substitue l'examen en IRM du poignet du membre supérieur gauche [12, 56].

En effet, plusieurs méthodes irradiantes existent parmi lesquelles celle recommandée par les experts du groupe d'étude international et interdisciplinaire sur la détermination de l'âge à visée médicolégale qui préconise un examen clinique et dentaire avec réalisation concomitante d'une radiographie de la main gauche et d'un panorex dentaire, complétés par une radiographie ou un scanner du bord médial des clavicules si le développement radiologique osseux de la main est terminé [12]. Le caractère irradiant de la détermination radiographique de l'AO, surtout sur la physe, explique qu'elle soit délaissée pour un autre examen d'imagerie non irradiant et plus performant, l'étude des mains et du poignet à l'IRM par exemple [56]. L'IRM présente l'intérêt de ne pas être irradiante au vu des techniques usuelles malgré des doses très faibles ce qui devrait naturellement la faire préférer [12].

Concernant les limites de la fiabilité qui viennent d'être avancés :

Deux commentaires que nous voulons y répondre :

a. Concernant la subjectivité de la lecture du cliché radiographique :

Malgré leur grande objectivité [132], plusieurs méthodes qualitatives, basées sur la radiographie du poignet et de la main, sont sujettes à une subjectivité de lecture des clichés radiographiques [3].

Pour pallier cette subjectivité, il sera préférable de suivre les recommandations suivantes :

- Faire appel à des lecteurs entraînés au quotidien [3].
- Pratiquer une double lecture indépendante [3].
- En cas d'une double lecture des âges osseux, faire une au moins obligatoirement par un lecteur entraîné et spécialisé, radio-pédiatre ou endocrino-pédiatrique (spécialisé dans les anomalies de la croissance) [39]. Ceci permet une évaluation à 6 mois près. Bien qu'il existe des possibilités d'erreur, certaines sont inhérentes à la méthode [39].
- Affiner l'évaluation de l'AO, basées sur la radiographie du poignet et de la main, en utilisant d'autres méthodes basées sur la radiographie du coude de face et de profil [132].
- Faire aussi, l'examen du développement pubertaire en milieu spécialisé avec éventuellement un contrôle 6 mois plus tard, ce qui doit augmenter la fiabilité de la détermination de l'AO [39].
- En cas de discordances importantes, demande un panoramique dentaire, bien qu'il ne constitue qu'un argument complémentaire [39].

En pratique quotidienne, et lorsque les observateurs, notamment en radiopédiatrie sont entraînés à une telle lecture, la méthode de GP a un taux de reproductibilité inter- et intra-observateur acceptable [3]. D'autre part, la différence inter-observateurs pour l'AO de la main déterminé avec l'atlas de Sempé et Pavia a été évaluée à 6,1 mois (maximum : 25 mois). Cette différence inter-observateurs se réduit à 1,8 mois (maximum : 13 mois) si l'on utilise l'AO déterminé au coude [87]. Ainsi, lorsqu'une précision optimale est requise, il semble intéressant d'utiliser les deux méthodes [87].

b. Concernant le manque de qualité du cliché radiographique :

Parmi les aspects de l'évolution de l'imagerie médicale, ceux qui concerne les progrès technologiques majeurs réalisés en Radiologie Conventionnelle Numérique, où les films étant appelés à disparaître [17, 82]. Grâce à l'ordinateur couplé aux rayons X et mis au cœur du procédé permettant l'acquisition des données, on était passé d'une image analogique comparable à une photographie à une image numérique « fabriquée » par un ordinateur [17], cette révolution technologique est née du couplage de l'ordinateur à des technologies basées sur l'utilisation des rayons X. Le résultat fut le passage de l'image analogique à l'image numérique [17, 82].

De manière générale, par rapport à la radiologie traditionnelle sur film, la radiologie numérique permet : (1) d'obtenir une meilleure qualité d'image [151, 82] grâce aux possibilités offertes par le filtrage numérique [151] ; (2) de donner accès à plus d'information, par la meilleure résolution de contraste [151, 82]. Les appareils peuvent être ramenés à des milliers de niveaux de gris accessibles à l'œil de manière optimisée suivant l'information recherchée [151].

Par ailleurs, les techniques de radiographie numérique sont principalement issues du secteur médical, où le principal objectif est de réduire au maximum les doses absorbées par les patients [97]. En effet, les techniques utilisées dans l'élaboration de l'image numérique permettent de réduire l'irradiation moyenne reçue par les patients. Techniquement parlant, l'énergie lumineuse recueillie sur la plaque est proportionnelle au flux de photons X capté dans une large gamme de valeurs d'exposition. Ceci signifie que les problèmes de surexposition sont résolus, pour le patient et le personnel, et cela limite le besoin de refaire des clichés jugés ininterprétables [82].

Malgré ça, aucune enquête n'est imaginable pour une étude séquentielle dans une population scolaire pour des raisons vraisemblablement plus éthiques que financières encore que le risque lié à [132] l'irradiation X soit des plus minimes [36, 132] étant donné la situation du membre thoracique aisément isolable [132].

En conclusion, quelles que soient les limites de l'utilisation de l'âge osseux évoquées précédemment, il reste l'examen de référence pour caractériser la croissance des enfants et adolescents. L'utilisation des méthodes de détermination de l'AO assistée par ordinateur, comme celles de Tanner et Whitehouse (CASAS) ou de Sempé, a permis d'améliorer sa précision et de diminuer le risque d'erreur lié à l'interprétation radiographique. Néanmoins, les critères retenus pour sa détermination demeurent les mêmes que pour l'AO standard et reposent sur l'apparition des noyaux d'ossification, la soudure des cartilages de conjugaison et/ou les modifications des noyaux d'ossification [32].

Techniquement, l'estimation d'âge doit être pratiquée par des spécialistes confirmés et comporter un examen complet ne se limitant pas à une expertise d'AO, dont on connaît les limites propres. La présentation des résultats de l'estimation d'âge doit être faite sous forme de fourchette au lieu d'indiquer un âge précis [142].

Il serait donc essentiel qu'une recherche soit entreprise pour tenter de savoir si l'élaboration de critères basés sur des indices aussi bien physiologiques, biologiques que de nature psychologiques permettant une appréciation la plus fine possible de l'âge, est de l'ordre du possible [52].

CHAPITRE IV :
MÉTHODES D'ESTIMATION DE L'ÂGE OSSEUX

« Il est certain que toutes les méthodes, même numériques, usent des mêmes informations " intrinsèques " sur l'ossification, son développement morphologique et les unions physaires, mais le but n'est-il pas d'outrepasser toutes les divergences pour intégrer au mieux le « langage », qui s'assimile aux hiéroglyphes, que l'enfant et l'adolescent nous parlent grâce à leurs changements, et par l'entremise d'images radiologiques changeantes »

Professeur Michel SEMPÉ
La pédiatrie au quotidien : Analyse de la maturation squelettique, 1987

IV.1. Introduction

IV.2. Les méthodes utilisant la radiographie du poignet et de la main gauches

IV.3. Les méthodes basées sur la radiographie des autres segments du squelette appendiculaire

IV.4. Des commentaires sur les méthodes d'estimation de l'âge osseux

IV.5. CONCLUSION : Quelle (s) méthode (s) utiliser pour l'estimation de la maturation squelettique ?

IV.1. Introduction

Plusieurs méthodes d'appréciation de l'âge osseux ont été établies il y a des dizaines d'années [36]. Ces méthodes existent pour approcher au mieux l'AO. Toutes ont le même principe : évaluer dans un premier temps la maturation osseuse, sur la base de radiographie, puis extrapoler un AO en fonction de cette maturation osseuse [87]. Toutes les méthodes d'estimation de l'AO, et de façon générale, s'intéressent à l'apparition des points (ou centres) d'ossification primaires ou secondaires, épiphysaires ou autres, des os, de leur croissance, de leur modelage, de la disparition des cartilages de conjugaison et des soudures diaphyso-épiphysaires ou autres par rapport à des données de référence [42, 62, 87]. Ainsi, toute estimation de l'AO produite par ces méthodes doit être interprétée par rapport à leurs échantillons de référence. Par exemple, la déclaration « cette fille a un âge squelettique de 10 ans selon la méthode telle » doit être interprétée comme « la maturation squelettique de cette fille est similaire à celle des filles de 10 ans dans l'échantillon de l'étude utilisé pour calibrer la méthode telle » [109].

Ces méthodes nécessitent un atlas de référence ou au moins une série d'images types des stades évolutifs suffisamment explicites. Ce principe peut être utilisé à plusieurs niveaux [87]. En fait, les planches de l'atlas donnent une information statistique, mais pas d'information individuelle [52].

Cependant, et dans le domaine pédiatrique, l'idée n'est pas neuve que chaque sujet en voie de croissance n'a pas à se conformer trop strictement à un modèle médian et qu'il faut connaître l'étendue des variations propres à une population d'origine très diverse [134].

Malgré de nombreuses études sur le sujet, les méthodes d'évaluation de l'AO ont très peu évolué depuis une soixantaine d'années [3]. La validité des méthodes est remise alors en cause [36], puisqu'elles sont assez précises dans les premières années de vie (0-9 ans), mais ensuite elles sont plus approximatives [87]. En effet, pas de standard universel [42], et l'AO, en tant que critère d'évaluation de la maturation squelettique, et donc de la croissance, reste cependant approximatif et n'est pas exempt de critiques, étant donné l'ordre d'apparition des points d'ossification qui n'est pas constant, des différences peuvent se voir d'un hémisquelette à l'autre, et des retards d'AO d'un à deux ans sont parfois observés chez des enfants dont la croissance staturale est normale. De ce fait, il est parfois difficile de rapporter à l'âge chronologique des événements biologiques, sachant qu'une année de développement ou de croissance en termes d'évènements nouveaux n'est pas obligatoirement superposable à une autre année. Ces difficultés pour trouver des témoins de la croissance directement applicables en pratique quotidienne ont conduit à rechercher des méthodes d'affinement de l'AO, telles que l'adjonction de l'analyse du coude et la méthode de Risser en période pubertaire, et à proposer des méthodes de cotation chiffrée de l'AO [32].

Ce sont toutes les articulations des membres qui ont été prioritairement mises à contribution pour évaluer la maturation osseuse ; toutefois hanches et bassin ont été liés [139].

Les types des méthodes :

Toutes les méthodes qui ont été proposées pour la détermination de l'AO des individus se distinguent en **quatre classes** [137] :

a. **Classe des méthodes quantitatives :**

Les méthodes quantitatives comptent le nombre des points d'ossification primaire ou secondaire apparus, et celui des fusions épiphyso-diaphysaires [4, 32, 42, 62, 121]. Il consiste à radiographier toutes les articulations au moins d'un même côté du corps et compter les centres ossifiés en y ajoutant les épiphyses fusionnées [137].

Ces méthodes sont grossières, inadéquates durant l'enfance et inutilement onéreuses et dangereuses par excès d'irradiation, en plus, elles relèvent bien souvent de l'expérience de chacun et sont à déconseiller vivement [137].

La méthode de Lefebvre et Koifman (1952) [121, 137] est un exemple, associent au total des "points" présents, l'apport excellent des dates limites d'apparition pour 36 os et épiphyses au niveau des six articulations principales qu'il faut savoir choisir [137].

b. **Classe des méthodes chronologiques :**

Les méthodes chronologiques déterminent l'AO en fonction de la date d'apparition ou de l'absence des points d'ossification à un âge donné [4, 32].

Ce sont des méthodes plus raffinées et sont fréquemment utilisées malgré le manque de données précises depuis l'âge d'apparition du dernier indicateur et les âges des soudures [137].

De plus, certaines méthodes ont des défauts qui leur sont propres [137] :

- Wilkins (1950 et 1957) donne des schémas approximatifs et ne fournit que des âges moyens d'apparition, sans même différencier les filles des garçons : les planches établies d'après lui ne doivent plus être utilisées [137] ;
- Lelong et collaborateurs (1954) recommandent les données de Vickers-Harding qui mêlent de façon assez complexe plusieurs méthodes mais ils en tirent des tableaux de la dispersion des âges d'apparition très clairs [137] ;
- Pyle et Sontag (1943), Sontag et Reynols (1945), Elgenmark (1946) ont établi des tableaux analogues pour toutes les articulations [137] ;
- Jeanneret (1958) met au point un "Cadran" particulièrement commode d'emploi et à vocation clinique ; malheureusement il ne permet qu'une transformation en âge et en vitesse instantanée "lente, moyenne ou rapide" qui ne se prête pas à une estimation chiffrée. Ce cadran a néanmoins le mérite de permettre de "débrouiller" rapidement une

situation et de trier les cas difficiles [137].

- Silverman, Garn et Rohman ont réalisés leur l'étude à partir de 20 centres d'ossification. Ces méthodes ne permettent pas d'évaluer la maturation squelettique entre cinq et 13 ans car la plupart des centres d'ossification apparaissent entre zéro et cinq ans, et les premières fusions épiphyso-diaphysaires débutent vers l'âge de 12 ans six mois ou 13 ans chez la fille. Pendant cette période, les centres d'ossification subissent des modifications morphologiques (qui seront analysées par les méthodes qualitatives) [32].

c. Classe des méthodes qualitatives :

Les méthodes qualitatives sont basées sur la détermination de l'AO en comparant la radiographie à étudier à celles de l'atlas de référence pour les enfants du même âge et du même sexe [4, 23, 32, 34, 42, 121].

Ces méthodes sont, en effet, centrées sur la possession d'un ouvrage de références visuelles, un « Atlas » ou une série d'images suffisamment explicites, pour permettre des comparaisons raffinées pour chaque articulations inventoriées [137] :

- pour le pied, Atlas de Pyle et Francis (1962) [137] ;
- pour le pied et la cheville, Atlas de Hoerr, Pyle et Francis [23, 121] ;
- pour le genou, Atlas de Pyle et Hoerr (1955 et 1969) [121, 137] ;
- pour les hanches et le bassin, schémas d'Acheson (1957) [137] ;
- pour le coude, schémas de Sauvegrain, Nahum et Bronstein (1962) [137] ;
- pour le poignet et la main, Atlas de Schmid et Moll (1960), Atlas de Roo et Schröder (1977) [137], Atlas de Sempé et Pavia (1979) [121, 135], Atlas de Tanner et Whitehouse [135] et aussi Atlas de Greulich et Pyle (1950, 1959, 1971) [121, 137]. Ce dernier ouvrage était de loin le plus utilisé dans son avant-dernière édition [137].

L'âge squelettique implique alors, la comparaison de radiographies de certaines régions avec des images standardisées des mêmes régions ; l'âge squelettique fixé est celui qui est porté par la radiographie standard qui correspond le mieux au cas étudié [69] ; cependant, cette méthode des Atlas ou des planches de schémas pouvant en tenir lieu, est forcément approximative et comporte bien des aléas, ne serait-ce que ceux du choix des images de référence et de la subjectivité de l'observateur [135].

d. Classe des méthodes numériques :

Les méthodes numériques, ou méthodes de cotation [62] [137], sont plus compliquées [4] et font appel à une cotation séparée des différentes pièces osseuses ou points d'ossification radiographiées [4, 42, 86, 121]. Le total de ces cotations séparées aboutit à une cotation globale [4], ce calcul de scores indique le stade de maturation osseuse [23, 121].

Les méthodes d'Acheson [86], de Sauvegrain et coll. (1962) [121], de Tanner et coll. (1962) [23, 121] et de Sempé sont des exemples [23].

Ces méthodes consistent à donner un chiffre à chacun des noyaux en fonction de sa morphologie au cours de la croissance [86], même pour les éléments évolutifs des crêtes, encoches et tubercules qui prennent eux aussi une cotation. La somme de toutes les notes donne l'appréciation de l'AO [121]. Le principe de chiffrage est lié au besoin « de se donner une échelle chiffrée adéquatement » [137]. En effet, aucune corrélation avec les données biologiques et spécialement hormonales ne sera réalisable sans un code numérique transférable sur ordinateur et sans que les changements de rythme de maturation n'aboutissent à des accroissements numériques différents [137]. Certes, dans l'estimation de l'AO, le recours à la seule échelle « temps » est insuffisant, mais l'inconvénient est l'arbitraire de toute notation avec son caractère apparemment subjectif [137].

Ces méthodes sont très longues et ne sauraient être utilisées en routine clinique [86].

Il est certain que toutes les méthodes, même numériques, usent des mêmes informations « intrinsèques » sur l'ossification, mais le but n'est-il pas d'outrepasser toutes les divergences pour intégrer au mieux le « langage », qui s'assimile aux hiéroglyphes, que l'enfant et l'adolescent nous parlent grâce à leurs changements, et par l'entremise d'images radiologiques changeantes [137].

Les méthodes numériques dérivent des schémas de l'Atlas de Greulich et Pyle (2ème édition), lui-même perfectionnement de l'Atlas initial de Todd. Cependant, Greulich et Pyle (GP) en publiant leurs remarquables schémas n'ont pas cherché à leur donner une note, et ceci a perpétué l'erreur de Todd qui croyait en une maturation uniforme [137].

R.M. Acheson en introduisant en 1954 la notion d' « Unités de maturation d'Oxford » débloquait cette situation « en inventant un système de notes pour la main, le poignet… » et, en montrant que l'arbitraire était acceptable dès lors qu'il aboutissait à une représentation, même approchée et partielle du réel, susceptible « de mesurer la maturation sur une échelle qui ne nécessitât pas de référence directe à la taille de l'os et qui fût indépendante de l'âge de l'enfant » [137].

Dans l'étude d'Oxford, il a été décidé qu'une unité serait attribuée à un os chaque fois qu'un changement distinct de l'ombre se manifesterait, et selon cette méthode le total d'unités attribuées à un os lors d'une période de son développement serait une mesure exacte de sa maturation. Les indicateurs admis pour la main et le poignet sont basés sur ceux décrits par GP (1950), en complétant le travail de Todd ; ces déterminants de la maturation furent

choisis parce que facilement reconnaissables sur un grand nombre de films [137].

Malgré la notion du non synchronie de chaque indicateur à la fois dans le moment de sa manifestation et dans la durée de son apparence [132], la méthode d'Oxford ne s'attaque jamais à cet « asynchronisme » de maturation entre les centres osseux, où les centres épiphysaires des phalanges peuvent être bien développés, donc précoce, par rapport à l'ossification carpienne ou l'inverse. Bien qu'un grand déséquilibre ou asynchronisme de ce genre tend à diminuer au cours du développement et devient léger à la période prépubertaire [137].

Le plus important est le besoin largement et justement reconnu de considérer le schéma de développement de chaque centre d'ossification séparément, et puisque les ossifications des os courts du carpe et des épiphyses des os longs du poignet et de la main sont les aspects d'un même processus, il est donc justifié d'additionner leur compte. Tout ça, sans éclaircissement, jusque-là, sur la manière d'arriver à la meilleure méthode pour déterminer la maturation osseuse globale d'un enfant [137].

Malheureusement, ces indicateurs osseux sont trop pauvres et sont loin de couvrir la richesse de toutes les images successives que l'on pourra constater. En plus, il faut rappeler, l'auteur s'est borné à la période allant de la naissance à cinq ans, sachant que à cet âge déjà certains os ont largement dépassé le moment du changement distinct ayant permis d'attribuer l'unité la plus élevée prévue. La notation en unité de maturation d'Oxford est donc volontairement limitée aux premiers stades du développement de chaque os et, pour les épiphyses du métacarpe et des phalanges, ne conserve même que la seule notion d'absence ou de présence [137].

Tanner, Whitehouse et Healy ont mis au point en 1959 une méthode beaucoup plus élaborée, appelée « Standards pour l'âge squelettique » avec la description de 8 à 9 indicateurs de maturation analysés non par rapport à l'âge mais par rapport à tous les autres indicateurs selon une échelle proportionnelle. La « règle graduée » est ainsi fabriquée en fonction du rang de chaque indicateur et l'arbitraire d'une échelle purement ordinale disparaît [137].

IV.2. Les méthodes utilisant la radiographie du poignet et de la main gauches

Bien que l'évaluation de la maturation squelettique puisse se faire sur l'ensemble du squelette, une seule radiographie du poignet et de la main gauches de face de bonne qualité, suffit la plupart du temps [23]. En effet, la multiplication de radiographies centrées sur toutes les articulations fait courir un risque bien souvent inutile au sujet alors qu'il est depuis longtemps prouvé que le poignet et la main sont suffisants [134].

Pour apprécier la maturation squelettique alors, la seule radiographie de face du poignet et de la main au complet, à gauche, est nécessaire et suffisante [135], c'est la méthode la plus courante et la plus facile à réaliser pour la détermination de l'AO, celle qui repose sur la radiographie de la main et du poignet gauche [53, 54]. Ces méthodes sont encore à l'heure actuelle les méthodes de référence [36].

Le côté gauche est choisi par convention anthropologique internationale (1912, Monaco) [23, 134], admise par Todd et les anthropologues [139]. Ceci permet un suivi séquentiel, puisqu'il peut exister des différences maturatives entre les deux mains, en fonction du côté dominant [23].

Des clichés comparatifs seront réalisés en cas d'antécédents pathologiques à gauche qui auraient pu modifier la maturation (essentiellement fractures ou hémiplégie cérébrale infantile) [23].

De point de vue historique, ce sont les travaux de J.W. PRYOR (1904), un jeune anatomiste du Collège d'Etat du Kentucky, qui avaient conduit à admettre que l'ossification est symétrique, malgré de faibles variations bilatérales intra-individuelles. Quelques années plus tard, J.M. ROTCH (1909), un pédiatre, concluait que les processus d'ossification de la main et du poignet pouvaient « être considérés comme rassemblant des indications suffisamment précises du développement général ». D'où finalement la convention proposée par W. TODD et universellement admise, de « travailler » sur les radiographies de la main et du poignet gauches. Par ailleurs, ROTCH écrivit en 1909 : « De l'analyse de près de 1.000 cas, j'en suis arrivé à la conclusion que dans le déroulement du développement de la naissance à l'adolescence, les changements normaux qui surviennent dans le poignet et la main correspondent si étroitement à ceux qui surviennent dans les autres articulations que, chez la grande majorité des individus, le poignet et la main peuvent être considérés comme rassemblant des indications suffisamment précises du développement général » [137].

Enfin, l'examen radiographique de cette partie limitée du corps permet une appréciation suffisante de l'état du reste du squelette : « la main se développe parallèlement au squelette ». L'état de la main est la référence habituelle [69].

Avantages de la radiographie du poignet et de la main gauches :

Le choix du poignet et de la main, à gauche de par la convention admise par TODD et les anthropologues, est un gain de temps, d'argent et d'expérience considérable que de pouvoir localiser son attention sur une seule radiographie, facile à répéter et sans aucun danger pour les enfants et les adolescents. Il y a 33 os, osselets, (sésamoïdes) et épiphyses isolables au niveau du poignet et de la main, plus que dans toutes les autres articulations réunies, leur position est précise, leurs rapports bien déterminés de telle sorte qu'un cliché de profil est inutile. Juxtaposés les uns à côté des autres, les films peuvent être embrassés d'un coup d'œil puis analysés par comparaison avec beaucoup de facilités. Enfin, la technique radiographique est simple et les pochettes se rangent aisément, sans prendre trop de place [137].

En effet, le cliché radiographique du poignet et de la main gauches est un examen qui va présenter un très grand nombre d'avantages [23, 55, 135] :

- Il est unique ;
- Il est facilement reproductible et ne faisant courir aucun risque au sujet lors du renouvellement indispensable des radiographies ;
- Il est peu coûteux ;
- Il est indolore ;
- Il est sans danger puisqu'il se fait avec un minimum d'irradiation ;
- Il ne nécessite pas d'équipement particulier ;
- Il est instructif à tous les âges, de la naissance à la fin de la puberté, contrairement à d'autres indicateurs de maturation, comme la radiographie du coude qui n'a d'intérêt le plus souvent qu'à partir de 8 ou 9 ans ;
- Il intéresse une région anatomique petite et accessible (main et poignet), mais suffisamment riches en indicateurs ;
- Il permet d'étudier un maximum d'indicateurs avec un minimum d'irradiation, puisqu'il le poignet et la main comportent à eux seuls trente-trois (33) os, osselets, sésamoïdes et épiphyses, qui sont loin d'avoir la même évolution dans leur ossification et dans le temps, et ce nombre est plus qu'au niveau de toutes les autres articulations réunies.

L'ossification de la main donc, est un reflet représentatif de la maturation osseuse de l'ensemble du squelette [121]. Pour cela, plusieurs méthodes permettent l'évaluation de la maturation osseuse, basée soit sur un principe de comparaison entre les radiographies de la main et du poignet et des atlas de référence, soit sur des systèmes de cotation en fonction de degré de la maturation des points d'ossification [124]. En effet, les méthodes d'évaluation les plus couramment utilisées se fondent sur la radiographie de la main et du poignet gauche, soit par comparaison avec des clichés de référence, existants sur des tables de clichés d'une population américaine, des années 30 et 40 dans l'atlas de GP ou d'une population britannique des années 50 selon la méthode de TW [52], soit par cotation de points d'ossification à partir de

radiographies d'une population d'enfants français des années 70 selon la méthode de Sempé [23].

Schématiquement, ces clichés radiographiques analysent l'existence et la taille des points d'ossification [52] des os du carpe, des métacarpiens, des phalanges, du radius et de l'ulna, qui seront évalués en termes de degré de maturation [121], y compris les os sésamoïdes du pouce [52].

Si les atlas (GP, TW, Sempé-Pavia) gardent un intérêt évident en pratique clinique quotidienne, les méthodes numériques (Tanner, Sempé) semblent apporter une précision incontournable en recherche clinique, bien que leur complexité en limite souvent l'utilisation [24].

IV.2.1. Méthode de Greulich et Pyle

La méthode de Greulich et Pyle, est la méthode de référence pour déterminer un âge osseux, développée en 1950 [34, 36, 87], reste actuellement la méthode la plus utilisée [3, 39, 86, 89], surtout aux Etats-Unis [32]. Elle a été inventée par William Walter GREULICH (1899-1986) et Sarah Idell PYLE (1895-1987) [24].

1- Description :

La méthode de Greulich et Pyle est une méthode qualitative d'évaluation de l'AO [3, 4, 34, 121, 137]. Elle est basée sur un Atlas de radiographies du poignet et de la main gauches, classées par âge et par sexe [3, 4, 35, 53, 54, 62, 86, 87, 89, 124]. L'atlas se compose d'une série de reproductions de la main et du poignet gauches, chaque reproduction correspondant à l'aspect moyen d'un AC selon le sexe [4], il définit alors, des standards moyens pour des garçons et des filles correspondant à des clichés radiographiques qui restituent le degré de maturation qu'atteint en moyenne un enfant ou un adolescent à un âge considéré [86].

En effet, l'Atlas de GP (première édition, 1950 ; seconde édition, 1959 ; 1964 - Californie), est basé sur une étude faite à la Stanford University de Californie [23, 24, 67, 88]. L'Atlas comporte des radiographies dites « standards » du poignet et de la main gauches de filles et de garçons [23, 24], qui ont été sélectionnées par les auteurs, parmi 100 radiographies du même âge, étant supposées être les plus représentatives d'âges chronologiques de la moyenne du groupe [23, 24, 121]. De même, chaque radiographie comporte 29 centres d'ossification observables (19 pour les doigts, 8 pour le carpe et les 2 épiphyses distales de l'avant-bras) qui ont été scrutés afin d'en faire ressortir l'aspect le plus caractéristique en rapport avec l'AC connu [67].

A côté des images radiographiques, il existe des schémas explicatifs [121].

L'échantillon, choisis d'une population californienne [88], est composé d'enfants et d'adolescents d'Amérique du Nord (essentiellement de Cleveland, Ohio) [23, 24, 35, 42, 48, 53, 54, 67, 86, 88, 121, 124], de race caucasienne [48] blanche [53, 54, 86, 88], descendants de sujets d'Europe du

Nord [35, 42, 53, 54, 86, 88, 121], et de milieu familial aisé [35, 53, 54, 67, 86], durant les années 30-40, depuis leur naissance jusqu'à l'âge de 18 ans[67].

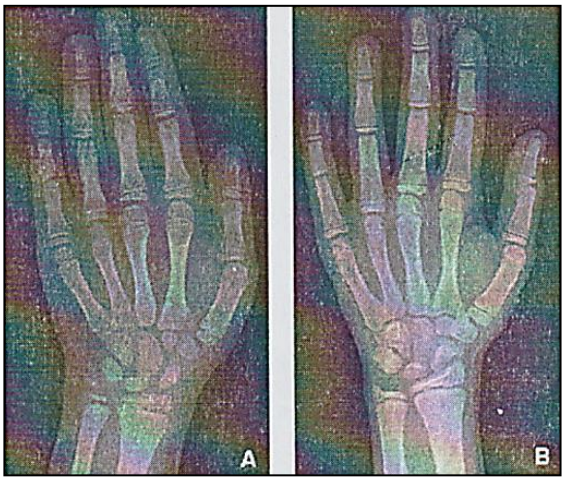


Figure 93 : Méthode de GP. Main et poignet gauches de face. AO correspondant à l'AR chez deux patientes différentes. Comparaison des points épiphysaires des phalanges à l'atlas de référence [4]

Greulich et Pyle ont groupés les radiographies par classes d'âge, et ont organisé leur atlas en deux parties [67] :

- La première, consiste en 2 séries (une par sexe) de clichés considérés comme standard pour l'âge en question [67], ces radiographies sont espacées de 3 mois de la naissance à l'AC de 18 mois, de 6 mois jusqu'à l'âge de 6 ans, puis d'un an ensuite, pendant la puberté et jusqu'à l'âge adulte [23, 24], comme suit :
    - 29 clichés standard Féminin [23, 24, 67] (naissance ; 3 mois, 6 mois, 9 mois ; 1 an, 1 an 3 mois, 1 an 6 mois, 2 ans, 2 ans 6 mois, 3 ans, 3 ans 6 mois, 4 ans 2 mois, 5 ans, 5 ans 9 mois, 6 ans 10 mois, 7 ans 10 mois, 8 ans 10 mois ; 10 ans, 11 ans, 12 ans, 13 ans ; 13 ans 6 mois ; 14 ans, 15 ans, 16 ans, 17 ans, 18 ans ; 28 ans et 50 ans, ces deux derniers clichés appartenant à la mère de quatre enfants comprise dans l'étude initiale) [67] ;
    - 31 clichés standard Masculin [23, 24, 67] (naissance ; 3 mois, 6 mois, 9 mois ; 1 an, 1 an 3 mois, 1 an 6 mois, 2 ans, 2 ans 8 mois, 3 ans, 3 ans 6 mois, 4 ans, 4 ans 6 mois ; 5 ans, 6 ans, 7 ans, 8 ans, 9 ans, 10 ans, 11 ans ; 11 ans 6 mois, 12 ans 6 mois, 13 ans, 13 ans 6 mois ; 14 ans, 15 ans ; 15 ans 6 mois ; 16 ans, 17 ans, 18 ans, 19 ans) [67].
- La deuxième partie recense, pour chacun des 29 os de la main et du poignet, les différents états caractéristiques des centres d'ossification pour l'âge qui ont été retenus pour le choix de clichés standard [67].

La méthode de GP est destinée à diagnostiquer une maturation osseuse précoce ou tardive chez l'enfant dont on connaît l'AC, ce qu'il permet de faire par rapport à la valeur moyenne [86], elle vise aussi à déceler certaines pathologies, notamment des retards de croissance de l'enfant ou de l'adolescent [53, 54, 86], mais elle ne vise pas à attribuer un AC en fonction de l'AO [86]. Toutefois, elle est la plus utilisée en pratique médico-légale courante [62].

2- Historique :

C'est la méthode de Todd (1885-1938) qui a été la première méthode qualitative effectuée à partir de radiographies du poignet et de la main, elle a été perfectionnée par la méthode de GP [32]. En effet, l'Atlas initial est celui de Thomas Wingate TODD qui date de 1937, il fut revu par Greulich et Pyle et d'autres Atlas, du genou et du pied, basés sur les mêmes enfants, furent publiés [137].

Mais, pour beaucoup d'âges osseux, Todd n'a pas pu trouver de radiographies du poignet et main dans sa série qui puisse illustrer une maturation uniforme et donner ainsi des modèles satisfaisants. Dans les éditions suivantes de leur atlas, Greulich et Pyle ont utilisé d'autres collections de clichés, et cependant, pour certains âges osseux, ils ont dû utiliser des films qui montraient une irrégularité de maturation [137].

3- Principe et Technique :

L'expertise osseuse consiste en une radiographie de face de la main et du poignet gauches [3, 21, 86]. L'atlas de GP, étudie l'existence et la morphologie des os du carpe, des épiphyses des métacarpiens et des phalanges, des points épiphysaires inférieurs des os de l'avant-bras [3, 124], ainsi que l'apparition et la fusion des noyaux épiphysaires [62], et chaque os du carpe, chaque métacarpien, chaque phalange, sont étudiés séparément [121].

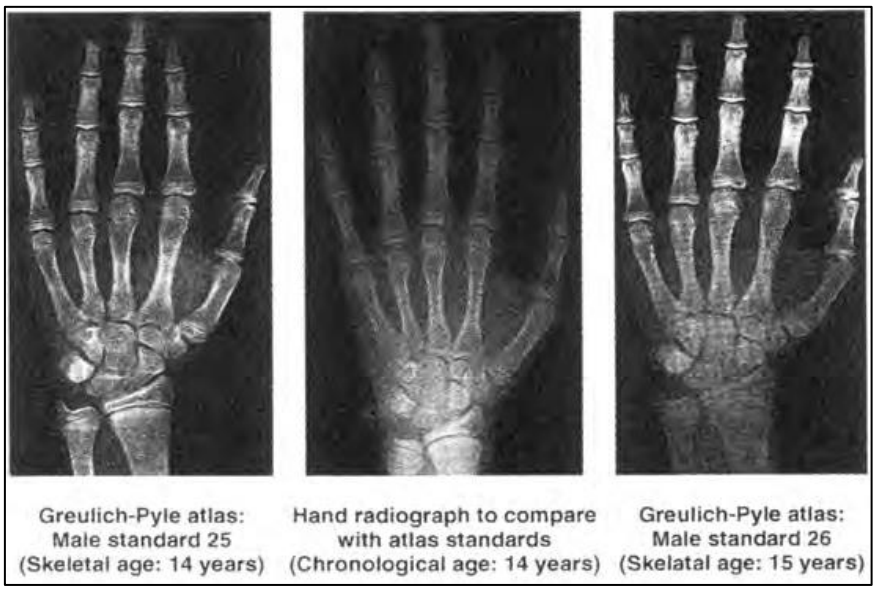


Figure 94 : La méthode GP est basée sur la comparaison au standard de l'atlas GP [67]

Les auteurs de l'Atlas préconisent son utilisation en deux temps : d'abord situer grossièrement le cliché à investiguer en lui trouvant le standard qui lui correspond le mieux, ensuite chaque os doit être contrôlé individuellement à l'aide de la 2ème partie de l'atlas pour vérifier la correspondance à l'AO du standard. En cas d'aspect visuel parfaitement identique, l'AO est celui du standard correspondant, sinon il correspond au schéma le plus proche [67].

L'âge osseux est déterminé en comparant la radiographie à étudier à celles de l'atlas de référence pour les enfants du même sexe [4, 32, 34, 86] : On compare l'état de progression de la fusion des cartilages de croissance, tels qu'ils apparaissent à la radiographie avec l'Atlas de GP, établissant une moyenne des maturations osseuses répertoriées pour une série de personne ayant un âge déterminé. A partir de cette comparaison, il serait possible de définir avec une certitude suffisante l'AC de la personne [3, 21, 86]. Et pour un cliché difficile, la solution de Pyle a été d'assigner un AO à chaque centre en cours d'ossification et de donner à l'enfant l'AO qui correspondait à la moyenne de tous les os [137].

Donc, l'étude de ces clichés radiologiques repose sur l'évaluation des noyaux d'ossification et la persistance ou non des cartilages de croissance au niveau des os longs [53, 54], elle tient compte de l'existence et de la morphologie des os du carpe, de l'existence, de la morphologie et de la fusion des épiphyses des métacarpiens et des phalanges et des épiphyses inférieurs des os de l'avant-bras [3, 34, 124].

Lorsqu'il existe une dissociation entre la maturation du carpe et la maturation des épiphyses des rayons, il faut retenir la maturation des épiphyses des phalanges [4], la priorité est toujours donnée aux doigts pour l'appréciation de la maturation osseuse [3]. La meilleure concordance entre l'AO et l'AC s'obtient sur l'observation des centres d'ossification épiphysaires distaux du radius, de l'ulna et des métacarpes [67].

Selon ces tables de référence, la fusion des cartilages est achevée en moyenne à 19 ans pour un jeune adolescent et à 18 ans pour une jeune fille. Les spécialistes évoquent alors des âges osseux de 19 ans ou de 18 ans ou parlent simplement d'âge adulte. Au-delà de cet AO maximal, le spécialiste ne peut que constater l'âge adulte du sujet, sans qu'il soit possible de déterminer depuis combien de temps cet âge a été atteint. Entre 16 et 19 ans, l'AO est arrondi à l'année, de même pour les jeunes filles entre 14 et 18 ans [86].

Bien que les auteurs de cet Atlas recommandent une analyse globale, certains critères sont parfois utilisés comme des repères pour évaluer l'AO. L'apparition de l'os sésamoïde du pouce est un des critères d'analyse souvent utilisé lors d'une détermination d'AO à l'aide de cet atlas dans la période péripubertaire [34]. Cet os qui est facilement reconnaissable [124], est visible sur l'Atlas de GP à partir de 11 ans chez la fille et 13 ans chez le garçon [4, 34, 124].

La précision de l'estimation de l'AO est au minimum à 6 mois près et le plus souvent à 1 an près [4, 87], mais en pratique, le profil évolutif de l'AO chez un enfant donné est beaucoup plus important que la valeur absolue de l'AO à un moment précis [4].

L'atlas GP définit des écarts standards (standard deviations) pour tenir compte de la variabilité individuelle, c.-à-d. des différences qui se manifestent au sein d'une même classe d'âge. Cet écart standard sera d'une unité (vers le haut et vers le bas par rapport à la moyenne), lorsqu'il englobera deux tiers de la classe d'âge, et de deux unités, lorsqu'il concernera 90-95 % de l'ensemble des sujets du même âge. Ainsi pour tous les jeunes qui n'entrent pas dans les deux unités d'écart standard GP affirment qu'ils connaissent un développement par définition anormal [86].

À titre d'exemple concernant cette variabilité individuelle de l'AO déterminée selon la méthode de GP, une unité d'écart standard pour un jeune adolescent de 17 ans est de 13 mois [48, 86], alors que pour une jeune fille à l'âge de 16 ans, elle est de 7 mois [86].

4- Avantages :

La méthode de GP est couramment utilisée pour plusieurs avantages :

- C'est une méthode éprouvée et reconnue pour la détermination de l'âge biologique [35, 39, 48], et son Atlas est un index bien utile [88] ;
- Elle est d'utilisation facile [4, 42, 124], simple [39] et rapide [35, 42] ; En réalité clinique, seule la première partie du travail, soit la comparaison aux clichés standard, est généralement effectuée, rendant cette technique simple d'emploi et rapide tout en conservant un degré de précision similaire aux méthodes de types scores qui scrutent chaque os du poignet et de la main [67] ;
- Elle est utilisée durant presque toute l'enfance, à partir de trois mois jusqu'en fin de croissance [4, 124] ;
- Elle présente un taux de reproductibilité intra- et inter-observateur acceptable en pratique [3, 4, 131], surtout lorsque les observateurs sont entraînés à une telle lecture, notamment en radiopédiatrie [3] ;
- Elle présente une bonne corrélation AO - AC [131] ;
- Elle est adaptée aux populations contemporaines [35], avec la fiabilité de l'Atlas de GP appliqué de nos jours [37] ;
- Aucune différence raciale n'a été démontrée à ce jour. Aux USA par exemple, il n'existe pas d'atlas séparés pour les différentes composantes raciales de la population [39] ;
- Elle est fiable à plus ou moins 18 mois [53, 54] ;
- La lecture de l'AO par la méthode de GP permet d'apprécier avec une bonne approximation l'âge de développement d'un adolescent en dessous de 15 ans [39].

5- Critiques et réponses :

La fiabilité de la méthode de GP dans la détermination de l'AO rencontre plusieurs critiques, ces reproches concernent sa référence, son principe et sa lecture, on cite quelques-unes :

a. Des reproches qui concernent la référence = « l'Atlas » :

- (1) L'atlas de GP comporte 29 radiographies dites « standards » du poignet et de la main qui ont été sélectionnés par les auteurs, comme leur semblant les plus représentatifs d'âges chronologiques déterminés. Ce choix de principe de « standards » est discutable car les critères en sont subjectifs. Cet atlas n'intègre pas la notion d'évolution longitudinale, puisque ce ne sont pas les mêmes enfants qui sont suivis de la naissance à l'âge adulte [23, 24] ;
- (2) La radiographie « standard » de 11 ans, mal choisie puisqu'elle correspond à un stade maturatif de 12 ans, augmente encore les difficultés et les aléas d'interprétation à cet âge essentiel [23, 24] ;

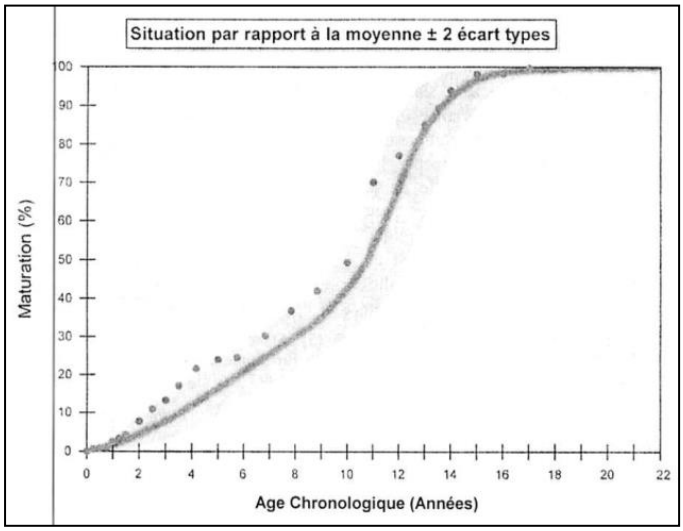


Figure 95 : Résultats de l'analyse des 28 radiographies « standards » filles de l'atlas de GP selon Maturos 4.0 CD : critique du choix du « standard » à 11 ans [24]



Figure 96 : Fille « standard » 19 - AO à 11 ans [35]

- (3) L'analyse des clichés des filles objective une certaine surévaluation des enfants américains par rapport à la moyenne française. On peut donc se demander si la dynamique de croissance et de maturation d'enfants de l'Ohio est parfaitement comparable à celle des enfants Français et Espagnols suivis par les auteurs de l'atlas Sempé et Pavia, voire à celle de la majorité des enfants européens [24] ;
- (4) Les radiographies de l'Atlas sont espacées d'un an, pendant la puberté et jusqu'à l'âge adulte. L'intervalle d'un an proposé pour les radiographies en période pubertaire, nous semble insuffisant à un âge où les variations de maturation osseuse sont très rapides avec des conséquences pratiques (comme dans les pubertés précoces) qui peuvent être très importantes [23, 24] ;
- (5) L'Atlas de GP a été établi il y a plusieurs décennies, à la fin des années 50 [4, 89, 124], sur une population de référence d'enfants nord-américains qui ne correspond plus tout à fait à celle que nous étudions actuellement, cet Atlas n'apparaît plus strictement superposable à nos jours [4, 89, 124, 131] ;

  En effet, les auteurs de l'étude Ontell ont dû constater que, de manière générale, la maturation osseuse était plus précoce dans les années 90 que dans les années 30 au moment de l'adolescence, par exemple pour les adolescents de race blanche, la valeur moyenne s'inscrit 1,8 mois avant la moyenne définie par GP. Cette plus grande précocité est encore plus marquée pour les sujets d'autres ethnies, même si la référence ici ne concerne que des personnes de race blanche des années 30, par exemple pour les adolescents de race noire, la différence est de 4,9 mois, et quant aux jeunes filles, elles sont plus précoces de 3,9 mois si elles sont de race blanche et de 9,6 mois si elles sont de race noire [86]. Bien que les variations de la distribution normale liées à la pondération ethnique selon l'âge chez GP soient bien connues, elles sont partiellement investiguées [48] ;

  Ces constatations sont confirmées par une autre étude réalisée en 1993 pour une actualisation des tables de GP [86, 88] faite par R. T. Loder [86]. Ce dernier a constaté que la maturation chez les garçons de race blanche présentent une évolution accélérée de la maturation des os avec une accélération d'environ 0,5 année (5,4 mois) pour la période de 13 à 18 ans, tandis que pour les jeunes garçons de race noire, il n'y avait pas de grande différence pour les adolescents de même période d'âge qui montraient une

accélération de la maturation du squelette de +/- 0,4 ans (4,5 mois). Alors que la situation est très différente pour les filles : chez les jeunes filles, la maturation est précoce de 1,9 mois si elles sont de race blanche et de 8,1 mois si elles sont de race noire [86, 88]. Pour l'auteur, de ce qui précède apparaît la complexité de la maturation squelettique par rapport aux facteurs temps et ethnie [88] ;
Il est incontestable que cet ouvrage de référence ait été d'un apport essentiel en pédiatrie dans les années 1950-1970, il ne nous semble pas judicieux de l'utiliser actuellement pour les enfants européens, surtout en période pubertaire [24] ;

- (6) Au total, les plus importants reproches à la méthode GP sont :
    - l'ethnie unique (caucasoïde, USA) de l'échantillon servant de référence ;
    - le niveau socio-économique plutôt élevé de cet échantillon (absence de malnutrition) ;
    - la date de cet échantillon, qui ne tient pas compte, de nos jours, d'un possible effet séculaire, c.-à-d. l'évolution de l'AO sur une longue période, un siècle ou plus ;
    - la détermination discontinue de l'AO (saut dans le temps d'un cliché standard à son successeur ou son précédent) ;
    - une reproductibilité éventuellement faible entre observateurs [67].

Réponse :

Plusieurs études appliquées sur la méthode GP ont poussés ses auteurs à conclure la fiabilité de cette méthode [67] :

- Stevens-Simon et McAnarney ont trouvé une bonne corrélation entre l'AO et l'AC (r=0,7) à l'aide de la méthode GP chez 93 jeunes femmes afro-américaines âgées de 12-18 ans et provenant d'un milieu socio-économique défavorisé. Les 100 % des filles dans la classe d'AC 15-18 ans montrent un AO moyen de 17 ± 0,9 ans, 25 % de ces filles ont complété leur croissance durant l'adolescence ;
- L'analyse de Wenzel et coll. bien qu'elle montre une précision moindre de la méthode GP par rapport aux méthodes de scores (TW-RUS ou TW-20), surtout chez les garçons autrichiens proches de la puberté, de l'échantillon, constate que la méthode GP leur donne un AO voisin de l'AC, ce qui tendrait à effacer l'effet séculaire pour cette méthode ;
- Enfin, Lynnerup et coll. ont testé la fiabilité de la méthode GP sur un échantillon danois et ne trouvent que de faibles variations intra- et inter-observateurs, et cela, quel que soit le degré d'expérience de ces derniers.

b. Des reproches qui concernent le principe = « la comparaison » :

Le cliché radiographique en question ne s'appariera au modèle de l'Atlas de GP qu'en de rares occasions, puisque la maturation que Todd croyait uniforme n'est pas une réalité [137], il existe donc une variabilité importante chez les utilisateurs de l'Atlas liée à la différence possible d'évaluation de similitude entre un cliché radiographique et une planche de l'Atlas [53, 54].

Réponse : Pour se servir de l'Atlas, il faut accorder la radiographie d'un enfant au modèle dont il s'approche le plus, et lui donner l'âge de ce modèle [137], les tables GP ne font que refléter une maturation osseuse atteinte en moyenne par une classe d'âge [86].

c. Des reproches qui concernent la lecture = « l'applicabilité » :

- (1) Des difficultés de lecture de l'AO chez le garçon existent pendant la période péripubertaire, à 10-12 ans [39]. De plus, l'Atlas de GP n'est pas pertinent au-delà de 16 ans [35, 131], à cause de l'erreur de lecture qui augmente avec l'âge, entre 14 et 18 ans [121], surtout entre 16 et 18 ans où l'appréciation de l'AO est particulièrement difficile [3]. La variabilité interindividuelle ou IC est à plus ou moins 2 ans, cette variabilité est plus importante à partir de 16 ans [131].

  Réponse : Pour pallier les difficultés de lecture d'AO chez le garçon de 10-12 ans, cette lecture doit être complétée par la mesure du volume testiculaire qui commence à augmenter au-dessus de ses dimensions impubères (18 x 8 mm), à partir de 11 ans [39].

  Il existe certes, des possibilités d'erreur de lecture de l'AO inhérentes à la méthode, telles les difficultés de lecture de l'AO chez les deux sexes au-delà de 15 ans, en particulier chez le garçon.

  La double lecture de l'AO par un lecteur entraîné, un radio-pédiatre et un endocrino-pédiatre (spécialisé dans les anomalies de la croissance), qui permet dans la plupart des cas une évaluation à 6 mois près, et l'examen du développement pubertaire en milieu spécialisé [39], avec un bilan hormonal (à la recherche de possibles anomalies hormonales) [48], complété au besoin d'une mesure de la hauteur utérine à l'échographie pelvienne chez la fille, avec éventuellement un contrôle 6 mois plus tard, renforceront la précision de la lecture et doivent augmenter la fiabilité de la détermination [39].

  Le Risser, radiographie de la crête iliaque, n'a que peu d'intérêt [39]. En France et en Belgique, par exemple, dans la tranche d'âge 10-15 ans chez le garçon et 9-13 ans chez la fille, il est d'usage de recourir en complément à la méthode de Sauvegrain et Nahum (étude du coude) [36].

En tout cas, et en pratique médicale, le profil évolutif de l'AO chez un enfant donné est beaucoup plus important que l'estimation de la valeur absolue de l'AO à un moment précis [3].

Bien qu'il soit édité en 1950 sur une population nord-américaine, l'Atlas de GP reste cependant adaptée aux populations européennes. Sa validité a été récemment vérifiée à travers l'étude d'une cohorte de plus de 1300 enfants du sud de la France [3].

- (2) Les tranches d'âge citées en haut, sont des tranches sensibles de point de vue médico-légal, auquel la question d'« âge » est posée en raison des dispositions judiciaires concernant les étrangers mineurs (dans le cadre d'application des mesures juridiques) [3]. La méthode de GP est non adaptée alors, lorsqu'elle est utilisée comme unique méthode [48], pour déterminer de façon adéquate si un requérant d'asile est mineur (en dessous de 18 ans) ou adulte [35, 48]. En effet, de nombreux médecins sont confrontés au problème de devoir déterminer l'âge des requérants d'asile à la demande des autorités en utilisant la méthode de GP. Les autorités attendent de cette méthode qu'elle détermine si une personne est âgée de moins de 18 ans puisqu'à partir de cet âge, la majorité est atteinte avec les conséquences que cela implique sur le plan juridique pour le demandeur d'asile. Le constat montre qu'un nombre accru de cas annoncés pour lesquels une différence de plusieurs années existait entre l'AC et l'âge estimé selon GP [48].

Ce qui est connu, c'est que la méthode de GP est une méthode standard, reconnue pour la détermination de l'âge biologique mais n'est pas conçue, ni prouvée comme fiable, pour la détermination de l'AC [48].

De plus, la variabilité individuelle (déviation standard ou DS) de l'AO déterminée selon la méthode de GP chez un jeune homme de 17 ans est par exemple d'environ 13 mois. Si l'on considère un intervalle de 2 DS, ce qui est d'ordinaire la règle pour les variantes de la norme en médecine, il s'ensuit un intervalle de plus de 2 ans. Un jeune homme de 17 ans normal et en bonne santé peut donc présenter un AO déterminé selon GP de 19 ans. Dans le cas de requérants d'asile sans AC documenté, la méthode de GP ne peut donc donner qu'une estimation grossière de l'âge biologique [48].

Au total, plusieurs éléments parlent contre l'usage de la méthode de GP pour déterminer l'âge des jeunes requérants d'asile [48].

Réponse : Devant une réquisition pour déterminer l'AO à des fins médico-légales [3], l'utilisation de la méthode de GP doit tenir compte de la variabilité individuelle [3, 35, 53, 54] qui est aussi

fonction des tranches d'âge, et qui n'est jamais inférieure, certes, à plus ou moins un an [3], c'est la fourchette d'estimation [35]. Bien que la lecture de l'AO, par un lecteur entraîné, radio-pédiatre ou pédiatre spécialisé dans les anomalies de la croissance, permet dans la plupart des cas une évaluation à 6 mois près [39].

Il paraît important de relayer largement ces informations auprès des institutions judiciaires [3] ; la mission de l'expert impose de fournir un âge, et la logique scientifique exige de fournir un IC [53, 54].

- (3) La méthode de GP est une méthode sujette à une subjectivité de lecture [3, 67], elle reste sensible à l'expérience des observateurs [67].

  Réponse : Cette subjectivité de lecture peut se réduire en faisant appel à des lecteurs entraînés au quotidien : plus ils sont expérimentés et moins grandes sont les variations intra- et inter-observateurs [3, 67] ; encore, cette subjectivité peut se réduire en pratiquant une double lecture indépendante [3].

Conclusion :

Malgré les critiques faites à la méthode de GP, elle a systématiquement été appliquée à tout l'échantillon des enfants suivis : plus de 4900 radiographies du poignet et de la main gauches, de 1 mois à 17 ans révolus [137], et bien qu'imparfaite, cette méthode reste actuellement la méthode de référence pour estimer l'AO quelle que soit l'origine géographique de la population [3].

À propos de l'Atlas de GP, R.M. ACHESON a dit : « Grâce au soin et à la pensée qui ont présidé à leur fabrication et à la spécialisation de leurs auteurs - surtout Idell PYLE qui était un élève de TODD et a consacré sa vie à ces Atlas - ces travaux ont une place considérable dont on ne les délogera vraisemblablement pas » [137].

IV.2.2. Méthode de Tanner-Whitehouse

La méthode de Tanner et Whitehouse, connue également sous l'abréviation « TW method » [67, 86, 94], est une méthode largement utilisée en Amérique du Nord, elle est éditée par James Mourilyan TANNER (1920-2010) et R.H. WHITEHOUSE [34]. Elle a été longtemps une méthode de référence [23].

Cette méthode repose sur l'étude de différents points d'ossification sur la radiographie du poignet et de la main gauches [24, 53, 54, 86, 94], comparés à des normes établies de manière restrictive, basées sur une population britannique [67, 88, 94] texane [42], anglaise et écossaise [23, 53, 54, 67, 86, 121], de classe socio-économique moyenne (classe ouvrière [67]), des années 1950-1960 [23, 53, 54, 67, 86, 121].

La table de Tanner est réalisée à l'Université de Londres [88].

Le CASAS, ou « computer-assisted skeletal age score » est une version assistée par ordinateur de la méthode d'âge osseux TW2-RUS (radius, ulna, os courts), où les scores d'âge squelettique sont traités par ordinateur, cette version a été créée pour augmenter la fiabilité et la validité [141].

1- Historique :

Initialement élaborée sur un échantillon des années 1950-1960, la méthode de Tanner-Whitehouse (TW1) a été modifiée et simplifiée [67, 121] plusieurs fois.

En effet et en bref, au fil des années, ce système a été repensé en passant d'un système initial connu sous le nom de méthode Tanner-Whitehouse 1 (TW1) à deux méthodes ultérieures connues sous les noms de Tanner-Whitehouse 2 (TW2) et 3 (TW3). Dans la version TW1, le score est dérivé de l'évaluation de l'ensemble des 20 os sélectionnés. Dans la mise à jour TW2, trois méthodes différentes sont distinguées : le score « 20 os » (comme dans TW1), le score « RUS » (radius, ulna, métacarpiens et phalanges) et « CARPAL », limité aux os du carpe. La version suivante (TW3) ne prend en compte que les os RUS et peut être utilisée via un logiciel [40].

2- Principe et Technique :

L'analyse numérique de TW est une méthode de cotation [42, 94]. Elle permet de séparer les cotations en deux estimations [94] :

- Une valeur basée sur 7 os du carpe (TW Carpe) [94], c'est le « Carpals Maturity Score » qui s'intéresse aux os de carpe [121].
- Une valeur basée sur les épiphyses du radius (R), de l'ulna (U) et des os longs de la main (TW-RUS) [94].

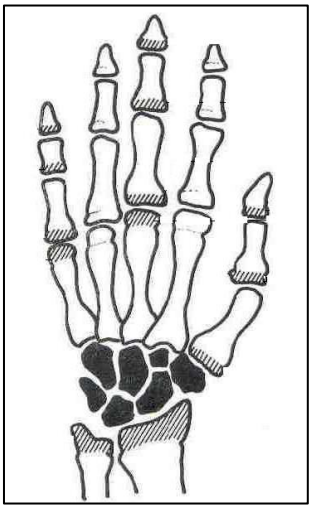


Figure 97 : Les épiphyses (en hachuré) utilisées pour l'estimation de l'AO par la TW3 à partir de la main et du poignet [94]

Cette analyse de cotation ne prend pas en compte le sésamoïde [34].

La maturation de chaque os est déclinée en 8 ou 9 stades, en évaluant la minéralisation, les dimensions et l'aspect morphologique des pièces osseuses

[121]. La somme donne le score établi à partir de l'analyse précédente, qui permet d'estimer l'AO [94, 121].

En fait, à chaque centre d'ossification retenu par la méthode est assigné un stade de maturation, sur 8 à 9 stades (nommé A à H ou I), établi par Tanner et Whitehouse. L'absence de signe de présence de l'os confère le stade « A », et, en fonction de la densité, de la taille, de la forme, de la régularité, de l'épaisseur de la ligne épiphysaire et de la fusion de la région épiphysaire, les stades « B » à « I » sont attribués [67].

La méthode TW2-20 repose sur l'analyse de 20 indicateurs (os) de la radio du poignet et de la main gauche [23, 24, 67, 94, 121], ce sont [67] :

- épiphyse distale radius + ulna (2) ;
- métacarpes + phalanges proximales + phalanges distales des rayons I, III et V (9) ;
- phalanges moyennes des rayons III et V (2) ;
- tous les os du carpe, sauf le pisiforme (7).

Si l'on observe que ces 20 os sont à maturation complète, on obtient un Score de Maturation Squelettique (SMS) de 1000 pour TW2-20 [67].

Par ailleurs, les auteurs de la méthode recommandent aux lecteurs que lors du doute sur le stade d'un des os du carpe, il faut privilégier les épiphyses des doigts, et s'ils commencent à se souder, attribuer aux os du carpe le stade final [94]. Le radius, l'ulna et les os du carpe contribuent plus au score final que les métacarpes et phalanges [67].

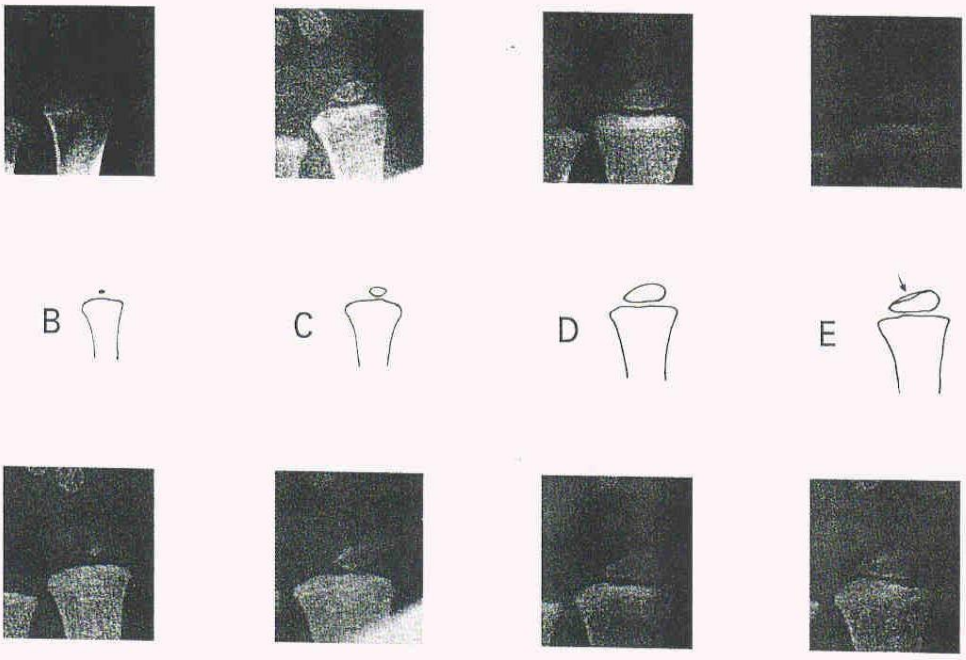
En tout cas, le TW3 RUS (Radius Ulna, Short bones) n'utilise pas les os du carpe. Ces derniers présentant une grande variabilité génétique individuelle dans le rythme de leurs apparitions et dans leurs aspects à un âge donné [94].

(a) En utilisant la dernière version de la méthode, la TW3, seul le "RUS score" (Radius, Ulna, Short bones) a été calculé [94], et seulement 13 centres d'ossification sont évalués, respectant les mêmes critères de la version des 20 centres [67].

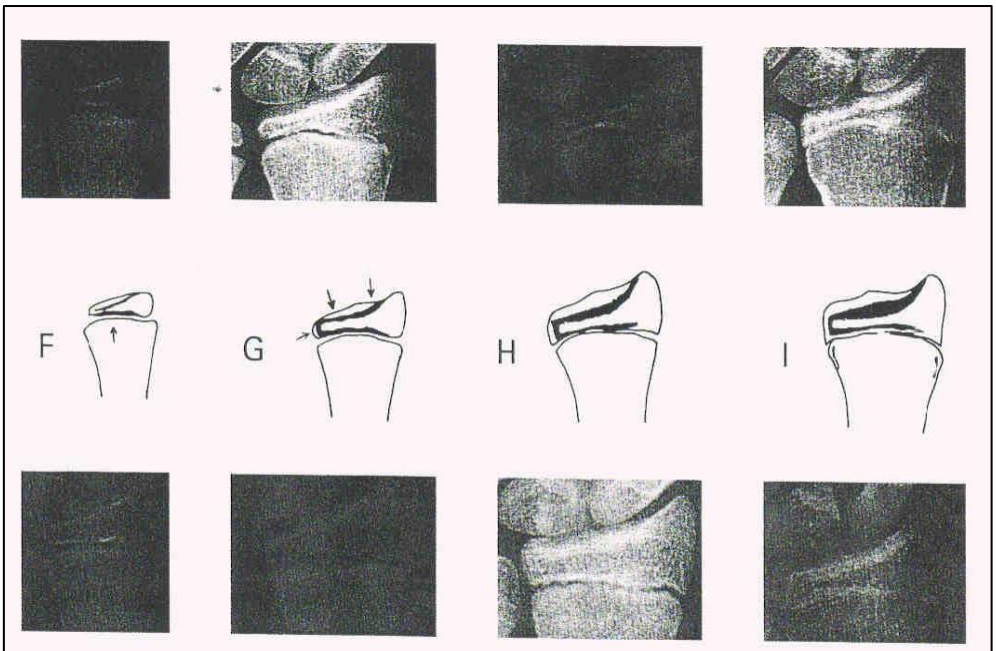
Ainsi, les épiphyses de treize centres d'ossification ont été examinées dans l'ordre suivant : épiphyse distale radius, épiphyse distale ulna, 1er, 3ème et 5ème métacarpiens, 1ère, 3ème et 5ème phalanges proximales, 3ème et 5ème phalanges intermédiaires et 1ère, 3ème et 5ème phalanges distales [67, 94].

Ces épiphyses ont été comparées avec les mini radiographies et les schémas correspondants désignés par les lettres « A » à « I » et les textes explicatifs proposés (exemple du Radius : Fig. 98) [94].

Une pondération individuelle était attribuée pour chaque os, en fonction du stade retenu et selon le sexe. L'addition de ces pondérations aboutissait à un score, le SMS, [94] qui était finalement reporté dans un abaque spécifique à chaque sexe [94] (table de référence [67]) ou sur une courbe (un graphique en percentile [67]) [67, 121].



BOYS' SCORES		GIRLS' SCORES
	Stage B	
RUS 16	(i) The centre is just visible as a single deposit of calcium, or more rarely as multiple deposits. The border is ill-defined.	RUS 23
	Stage C	
RUS 21	(i) The centre is distinct in appearance and oval in shape, with a smooth, continuous border.	RUS 30
	Stage D	
RUS 30	(i) The maximum diameter is half or more the width of the metaphysis. (ii) The epiphysis has broadened chiefly at its lateral side, so that this portion is thicker and more rounded, the medial portion more tapering. (iii) The centre third of the proximal surface is flat and slightly thickened and the gap between it and the radial metaphysis has narrowed to about a millimetre.	RUS 44
	Stage E	
RUS 39	(i) A thickened white line has appeared just inside the distal border of the epiphysis; this represents the edge of the palmar surface and the newly appeared bone distal to it is the edge of the dorsal surface.	RUS 56



BOYS' SCORES		GIRLS' SCORES
	Stage F	
RUS 59	(i) The proximal border of the epiphysis is now differentiated into palmar and dorsal surfaces; the palmar surface is visible as a broad, irregularly thickened white line at the proximal edge of the epiphysis. (ii) Both ends of the epiphysis, but particularly the medial one, have grown outwards and proximally since the last stage so that the proximal border now conforms to the shape of the metaphysis along most of its extent.	RUS 78
	Stage G	
RUS 87	(i) The dorsal surface now has distinct lunate and scaphoid articular edges joined at a small hump. (ii) The medial border of the epiphysis has developed palmar and dorsal surfaces for articulation with the ulnar epiphysis; either the palmar or the dorsal surface may be the one that projects medially, depending on the position of the wrist. (iii) The proximal border of the epiphysis is now slightly concave.	RUS 114
	Stage H	
RUS 138	(i) The epiphysis now caps the metaphysis on one (usually the medial) or both sides.	RUS 160
	Stage I	
RUS 213	(i) Fusion of the epiphysis and metaphysis has begun. A line may still be visible, composed partly of black areas where the epiphyseal cartilage remains and partly of dense white areas where fusion is proceeding; or the line may have disappeared.	RUS 218

Figure 98 : Comparaison du radius de la radiographie avec les schémas et mini radio et attribution d'un score individuel (stades de B à E) et (stades de F à I) [94]

Tableau 32 : Abaque spécifique des filles des Score de maturation squelettique (maturity score) et des âges osseux équivalents (bone age) [94]

Table A3 RUS (TW3) Bone Age for given RUS maturity score

GIRLS

Maturity score	Bone Age ('yr')	Maturity score	Bone Age ('yr')	Maturity score	Bone Age ('yr')
126	2.0	335	7.1	695	12.2
130	2.1	339	7.2	705	12.3
134	2.2	343	7.3	714	12.4
139	2.3	347	7.4	724	12.5
143	2.4	351	7.5	735	12.6
148	2.5	355	7.6	745	12.7
153	2.6	359	7.7	755	12.8
158	2.7	363	7.8	766	12.9
163	2.8	367	7.9	776	13.0
168	2.9	372	8.0	787	13.1
174	3.0	377	8.1	798	13.2
178	3.1	382	8.2	809	13.3
182	3.2	387	8.3	820	13.4
186	3.3	393	8.4	832	13.5
191	3.4	398	8.5	843	13.6
195	3.5	404	8.6	855	13.7
200	3.6	409	8.7	867	13.8
204	3.7	415	8.8	879	13.9
209	3.8	421	8.9	891	14.0
214	3.9	427	9.0	902	14.1
219	4.0	434	9.1	912	14.2
222	4.1	441	9.2	923	14.3
225	4.2	448	9.3	933	14.4
228	4.3	455	9.4	944	14.5
231	4.4	462	9.5	955	14.6
234	4.5	470	9.6	966	14.7
238	4.6	478	9.7	978	14.8
241	4.7	485	9.8	989	14.9
244	4.8	493	9.9	1000	15.0
248	4.9	501	10.0		
251	5.0	509	10.1		
255	5.1	518	10.2		
258	5.2	526	10.3		
262	5.3	535	10.4		
265	5.4	543	10.5		
269	5.5	552	10.6		
273	5.6	561	10.7		
277	5.7	570	10.8		
281	5.8	579	10.9		
284	5.9	589	11.0		
288	6.0	597	11.1		
292	6.1	605	11.2		
296	6.2	614	11.3		
301	6.3	622	11.4		
305	6.4	631	11.5		
309	6.5	640	11.6		
313	6.6	649	11.7		
318	6.7	658	11.8		
322	6.8	667	11.9		
327	6.9	676	12.0		
331	7.0	685	12.1		

L'AO était donné en décimal avec une unité annuelle. Pour le calcul, une calculatrice adaptée à la méthode a été utilisée [94].

(b) Concernant la version TW modifiée en semi-automatique dans les années 1990 [67] :

- La gradation des stades par centre d'ossification se fait de 1 à 9 ;
- L'image radiographique (posée sur un négatoscope) est captée par une caméra sur trépied puis transférée en tant qu'image numérique à un ordinateur ;
- L'ordinateur affiche l'image à l'écran dans un logiciel spécifique qui permet de choisir la forme correspondante de l'os à analyser (la forme à l'écran reproduit les 9 stades de l'ancienne méthode) et qui lui correspond le mieux ;
- Par une mise au point avec zoom de la caméra (opération manuelle) sur l'image et une sélection de la forme choisie par l'opérateur qui

apparaît en surimpression à l'écran, l'ordinateur calcule une valeur numérique qui correspond au score de l'os investigué, et ensuite la somme des scores est analysée selon la méthode classique ;

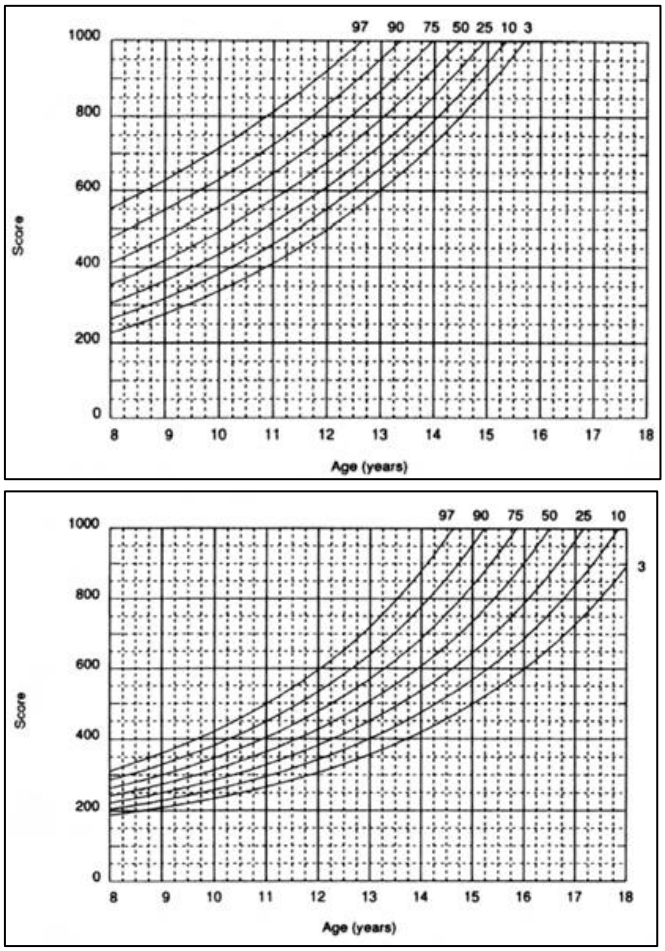


Figure 99 : Percentiles de SMS pour les filles et les garçons selon TW2-US90 [67]

- L'observateur, pour chaque os, peut être d'accord avec le score proposé et il valide alors la proposition ou ne pas être d'accord et il la rejette en assignant manuellement un score au centre d'ossification en question.

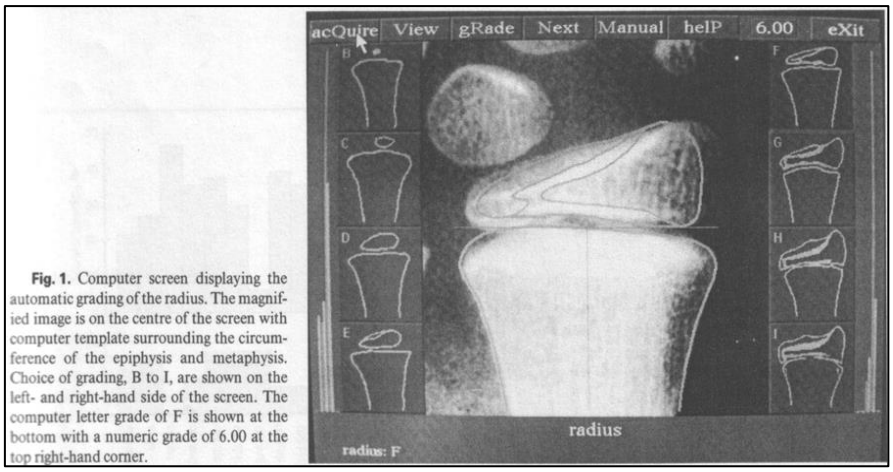


Fig. 1. Computer screen displaying the automatic grading of the radius. The magnified image is on the centre of the screen with computer template surrounding the circumference of the epiphysis and metaphysis. Choice of grading, B to I, are shown on the left- and right-hand side of the screen. The computer letter grade of F is shown at the bottom with a numeric grade of 6.00 at the top right-hand corner.

Figure 100 : Aspect à l'écran de la méthode TW2 numérisée [67]

3- Avantages :

- L'Atlas de TW est un index bien utile [88].
- Les stades de maturation et les scores de maturation squelettique (SMS) des centres d'ossifications retenus par la méthode ont l'avantage de ne pas avoir à faire de nombreuses comparaisons avec des standards comme dans la méthode GP [67].
- C'est une méthode plus fiable et plus précise [94], ces versions, TW1 et TW2, sont précises, et applicables pour les enfants américains (caucasoïdes et africains) et mexicains âgés de 6 à 13 ans, ainsi que pour les garçons belges âgés entre 12 et 19 ans [67].

4- Critiques :

La méthode de TW rencontre quelques reproches qui limitent son utilisation, nous citons quelque unes :

- (1) Elle a été longtemps une méthode de référence, cependant elle est actuellement réservée à quelques rares « initiés » [23, 24].
- (2) La méthode semble beaucoup trop longue dans les pratiques cliniques actuelles et même en recherche clinique [23, 24, 39, 42, 89], l'étude du cliché dure au moins 10 minutes [89] et l'observation des 20 os un à un prend beaucoup de temps [67]. La méthode allonge alors de façon très importante le temps de lecture [39, 94] sans apporter un gain significatif de précision [39].
- (3) La méthode semble aussi trop complexe pour une utilisation au quotidien [23, 39], sa très grande complexité est dû au nombre de degrés maturatifs différents selon les indicateurs et aux difficultés d'appréhension de certains degrés [24]. La lecture demande une expérience considérable, toutefois, des observateurs entraînés peuvent avoir des interprétations différentes [94].
- (4) Il semble qu'une doctrine médicale unanime s'accorde pour admettre que cette méthode ne prend pas en compte l'origine ethnique, les habitudes nutritionnelles et les autres facteurs individuels ce qui fausse évidemment grandement les résultats qui peuvent être obtenus [86].
- (5) Elle n'est plus applicable sur des sujets âgés de plus de 16 ans, ceci limite fortement les possibilités d'utilisation de cette méthode à l'égard des adolescents [86]. En effet, il est intéressant d'observer, d'après les percentiles de TW2-US90, qu'en tous cas 3% des garçons n'ont pas atteint le score de 1000, qui est la maturation complète, à 18 ans et donc cela réduit les chances de cette méthode pour déterminer l'âge de majorité, atteint ou non, pour les adolescents masculins [67].
- (6) Une limite de précision, car à certains stades de développement osseux, un petit changement de l'apparence d'un os peut être responsable d'une grande élévation du score squelettique [94].

IV.2.3. Méthode de Sempé

La méthode de Sempé est une méthode numérique, de cotation [42], éditée par Michel SEMPÉ (1930-2020), pédiatre et auteur des courbes de croissance.

1- Description :

La méthode de Sempé, éditée en 1979 sur une population française d'enfants et d'adolescents, permet la cotation de points d'ossification à partir de radiographies du poignet et de la main gauches [42, 121].

Une version informatique a été développée, basée sur cette méthode, appelée le logiciel « Maturos® », éditée par Docteur BOUCHARD Maryvonne et Professeur SEMPÉ [121], en 2001 [42, 121].

L'Atlas de la maturation squelettique : ossification séquentielle du poignet et de main

Cet Atlas a été élaboré par Professeur Sempé en collaboration avec Docteur Carlos PAVIA (endocrino-pédiatre, Barcelone) et édité en 1979 [23].

Il a été constitué, à partir de la collection des 5000 radiographies du poignet et de la main de l'étude auxologique française [23, 24, 132] qui ont pu être recueillies et conservées depuis la naissance jusqu'à la fin de l'adolescence [132]. Cette étude a été étalée donc sur une durée de plus de 20 ans (entre les années 1953 et 1975) [23, 24, 42]. L'étude a été parrainée par le Centre International de l'Enfance [23, 24, 134], puis par l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, et menée à son terme par Sempé à Paris, puis à Lyon [134].

Cette étude auxologique française, unique en son genre en France, était séquentielle de référence, et toute son originalité est de s'être adressée au même groupe d'enfants en bonne santé, suivis tout au long de leur croissance. C'est cette caractéristique essentielle qui définit une étude séquentielle continue par opposition à d'autres études semi-séquentielles dites discontinues dans lesquelles plusieurs groupes d'enfants (très jeunes, pré-pubères et adolescents) sont étudiés simultanément ou des études dites transversales [132].

Dans cet atlas, les radiographies de 4 filles (Nathalie, Véronique, Christine et Bénédicte) et de 3 garçons (Luc, François et Damien) sont présentées dans leur évolution de la naissance à la fin de la croissance [23].

La collection des radiographies a permis l'élaboration des courbes de croissance française [23, 24].

Cet atlas permet de mieux appréhender l'évolution de la maturation tout au long de la période de croissance, puisque ce sont les mêmes enfants radiographiés à des âges différents, qui sont retrouvés tout au long de l'atlas. De plus, le plus grand nombre de clichés en période pubertaire nous semble très utile. Enfin, il est le plus adapté au suivi d'enfants européens, par opposition aux échantillons américains [23].

2- Historique :

En 1979, Sempé et Pavia proposent un atlas actualisé sur la base de radiographies d'enfants européens [87].

Dès 1986, et pour pallier les difficultés de lectures et les imprécisions de l'atlas, Sempé propose une méthode de lecture facile, reproductible, précise au mois près [87].

Actuellement, cette méthode est disponible sous forme d'un logiciel automatisé d'analyse de l'AO : Maturos™ [87].

3- Approche :

La maturation squelettique est la transformation d'un modèle cartilagineux pour aboutir à l'achèvement d'un processus métabolique osseux complexe. Toute cette évocation d'un réel, qu'il n'est pas possible d'atteindre immédiatement, passera obligatoirement par la prise en compte d'ombres radiographiques conservées sur un film qu'il importera de dater et de nommer [134].

Ce n'est pas le moindre intérêt de la démarche auxologique que de faire émerger une notation alphanumérique à partir de visions fantomatiques d'une anatomie invisible autrement que par la traversée diffractée des rayons X [134].

C'est une certitude de recherche de considérer que toutes les analyses biochimiques ou biophysiques actuellement poursuivies sur une grande échelle perdent beaucoup de leur discrimination si elles ne se réfèrent chez l'enfant qu'au seul AC ou à un niveau de maturation subjectif que l'on rattache à un « âge » fictif [134].

La variabilité même de la dispersion de tous les sujets normaux impose de ne pas souscrire à un étalon temporel qui soit unique. Il n'y a pas un « AO » témoin d'une maturation idéale, mais deux limites supérieure et inférieure entre lesquelles les « équivalents en âge de la maturation squelettique » déduits de la méthode préconisée ont la même signification, voire la même conséquence immédiate, celle d'être une des manifestations de la maturation habituelle qui ne se réduit pas à un point sur une bissectrice qui ne serait asservi qu'au facteur temps [134].

Il n'est pas possible non plus de raisonner en termes d'âge car ce n'est, de manière détournée, que fabuler sur une moyenne. L'auxologie cherche à être la science de la dispersion somatique, de la variabilité des phénomènes, de leurs degrés de liberté. Il ne pouvait être question de s'intéresser à l'âge « osseux ». Aucune définition n'en existe et personne ne peut savoir de quoi il parle vraiment quand il évoque ce pseudo-concept [134].

Déterminer un tel « âge » imposerait de le connaître du début à la fin de l'ossification, donc d'avoir des tracés modélisés ou non qui permettraient de se repérer précisément durant toute la croissance. Mais, s'exprimer en un «

âge » n'est finalement qu'une moyenne, au mieux qu'une médiane. Or, par définition, une médiane laisse 99 % des références se trouvent de part et d'autre d'elle-même ! [135], c.à.d. d'un « âge médian supposé équivalent à la médiane de la mesure ou de l'indicateur isolé en fonction du sexe et de l'AC » [132].

Ainsi, le total pondéré des « notes » mises à chacun des aspects rencontrés chez les treize, quatorze, vingt ou vingt-deux os, osselets et/ou épiphyses retenus donnera un pourcentage de la maturation squelettique qui serait traité tel quel ou converti en un « AO » [135].

Une autre manière d'opérer serait de tracer la courbe de tous les pourcentages de référence et d'en extraire une médiane qui devient la référence théorique d'un « âge équivalent de la maturation squelettique pour un sexe et un AC donné ». En fait, il y faut de nouveau insister, de part et d'autre de cette médiane séparant la population en deux parties, la dispersion peut atteindre dix-huit mois chez les filles et deux ans chez les garçons et ceci de chaque côté ! On voit combien est importante la distribution «normale» d'un « âge » de l'ossification [135].

La maturation squelettique a donc un terme, est indépendante du genre Féminin ou Masculin, se distribue de manière variable au cours de sa durée. Elle s'exprimera donc par un pourcentage et non un « âge », par son allure qui n'est pas rectiligne, par l'évolution de chacun de ses (8) + 14 indicateurs. Il s'agit de ce fait d'une simple reconnaissance d'image désignée par une lettre, de l'addition des valeurs numériques attribuées à chaque lettre, de la transcription des totaux partiels et /ou complets. L'emplacement obtenu sur le tracé de référence est immédiatement celui d'un pourcentage, n'aura de sens qu'avec une deuxième analyse fournissant une pente, trouvera toute sa signification qu'à partir de la troisième analyse qui donne une dérivée seconde ou un accroissement : il y aura un gain en pourcentage ou une stagnation, mais jamais une régression [138].

Ma méthode n'est donc en rien une évaluation de l'AO. Elle prend le contre-pied de ce mode de raisonnement en posant en principe trois approches de cette question qui se veulent en dehors de tout dogmatisme [134] :

- La maturation squelettique se termine à 100 % de sa visibilité et les pourcentages successifs donnent autant d'accroissements ;
- La maturation n'est pas linéaire, les différents indicateurs ne sont pas synchrones et il existe des gradients évolutifs ;
- La maturation osseuse est indépendante du sexe, de l'AC et de la plupart des pathologies qui peuvent la suspendre certes, mais non l'entraver définitivement.

C'est en alignant les radiographies du poignet et de la main des infants, des enfants et des adolescents suivis séquentiellement les unes à côté des autres,

en respectant les intervalles de temps semestriels pouvant manquer, en lisant en quelque sorte la dynamique des images, qu'il m'a été donné de percevoir la maturation squelettique comme une cinèse[1], dont les trois périodes sont l'auxogénèse, la morphogénèse et l'arthrogénèse et/ou synostogénèse. Dès lors, la cinétique même de la construction osseuse à partir des données préalables de la cinétique cartilagineuse, permet de se faire une idée des rythmes constitutifs de l'ossification, donc des grandes périodes constructives [134].

La maturation squelettique du poignet et de la main se caractérise par des acquis positifs ou quelque fois un arrêt sur un ou plusieurs degrés, ces « pauses » étant d'ailleurs parfaitement physiologiques d'un semestre à l'autre dans certains territoires qui ne sont évidemment jamais les mêmes. On ne rencontre en nulle occasion, même dans des pathologies lourdes, des régressions des images. La croissance comme la maturation étant des phénomènes actifs, cinétiques, toujours en mouvement, leur représentation doit essayer de les approcher au mieux et, en pratique clinique, ce sont de toute évidence les accroissements qui seront les plus aisés à utiliser pour déterminer l'enchaînement des gains ou des acquis [132].

Il faut savoir que chaque osselets, sésamoïdes ou épiphyses interviennent à des moments différents pour « peser » plus ou moins fort dans le résultat de maturation osseuse attendu : la pondération ainsi obtenue fournit pour chaque degré de maturation une valeur toujours progressive mais généralement différente selon l'indicateur en raison même du décalage dans le temps de leurs interventions [134].

Ceci conduit à insister sur deux choses :

- L'importance de faire une grande confiance à l'évolution des images radiologiques et de traduire leur progression vers la maturité complète en valeurs numériques de maturation osseuse et non par un système de comparaison à des "standards" inappropriés à la population d'un pays [134].
- La nécessité de s'astreindre à une lecture séparée des différents indicateurs de maturation, un à un et non globalement, afin de ne perdre aucune des caractéristiques discriminantes qu'ils possèdent au décours de leurs changements et non de leur simple augmentation [134]. En effet, il est nécessaire d'insister sur la non synchronie de chaque indicateur à la fois dans le moment de sa manifestation, dans la durée de son apparence et, il faut aussi l'évoquer à l'usage, dans la perspicacité de l'observateur [132].

[1] Cinèse : Déplacement non orienté d'un animal, provoqué par un agent externe, physique ou chimique. (Définitions : cinèse - Dictionnaire de français Larousse)

Analyser la maturation squelettique sera donc rechercher un pourcentage de la maturation totale et le situer entre des bornes définies au mieux pour encadrer la zone de normalité, tout en se réservant la possibilité de renouveler ce jalon. Ce pourcentage se légitime du seul fait que la maturation squelettique a un terme obligé qui est celui de la maturité osseuse adulte. Les images radiographiques deviennent dès lors fixes, ayant perdu toute espèce d'évolutivité fonctionnelle, la sénescence intervenant sur un autre plan [134]. Par exemple, quand on dit qu'en 24 mois (de 14 à 16 ans), le % de la maturation est passé de 49 à 72 %, il ne faut absolument pas raisonner en valeurs absolues. 49 % signifient que le sujet est au seuil de son adolescence, donc que sa maturation totale (100 %) est encore à construire. De même, ayant atteint 72 % de cette maturation, cela ne veut pas dire qu'il aurait tant de centimètres à gagner encore dans sa taille, mais qu'il est aux trois quart (75 %) de cette édification. Ce ne sont que les additions des indicateurs de maturation (toujours croissant) qui vont permettre cette « dépense » mais nullement le délai et la quantité des % restant [132].

En fait, la maturation squelettique a un terme qui demeurera inconnu avant sa réalisation, équivaut mathématiquement à 100 % de son évolution et ne saurait être transgressé ; conventionnellement, elle a un début décidée par son ossification primitive qui ne peut être que 0 % [138] ;

Pendant cette maturation, il est clairement élucidé le décalage de maturation (ou avance)[1] des Filles par rapport aux Garçons, elles les précèdent toujours et conservent ce décalage, elles auront donc un relevé différent en pratique clinique. Ce décalage positif est de l'ordre de deux années chronologiques. Leur Médiane se termine à 100 % de leur maturation et il n'est pas rare de constater que la dissemblance au cours du temps dépasse les 2 années [132].

L'analyse de la maturation squelettique procède d'une triple démarche, dans une perspective démonstrative, probabiliste et conjoncturelle [134] :

- apparier les images radiographiques étudiées à celles de référence reproduites (dans l'ouvrage exposant la méthode ou sur l'écran de « Maturos » ou encore sur d'autres technologies) ;
- mémoriser la similitude la plus plausible en utilisant la lettre-repère indiquée (voire l'intervalle donné par la méthode ou « Maturos ») ;
- saisir l'information ainsi décryptée en additionnant les valeurs numériques (simple addition qu'effectuera le logiciel « Maturos »).

4- Principe et Technique :

(1) Le phénomène maturatif est un processus continu [23] qui va permettre de passer d'un modèle cartilagineux radio-transparent à la naissance, coté à

[1] Dans tous les cas, plutôt que de retard ou d'avance, termes bien trop souvent critiquables [135] et fort inadéquat [132], il importera de n'utiliser que le mot «décalage» qui sera dit négatif ou positif sans aucune connotation péjorative [135].

0 % de maturation, à un aspect adulte radio-opaque achevé et fonctionnel, évalué à 100 % de maturation [23, 24].

La maturation d'un « centre d'ossification » évolue schématiquement selon trois grandes périodes maturatives successives, qui sont l'auxogénèse, la morphogénèse et la synostogénèse ou l'arthrogénèse :

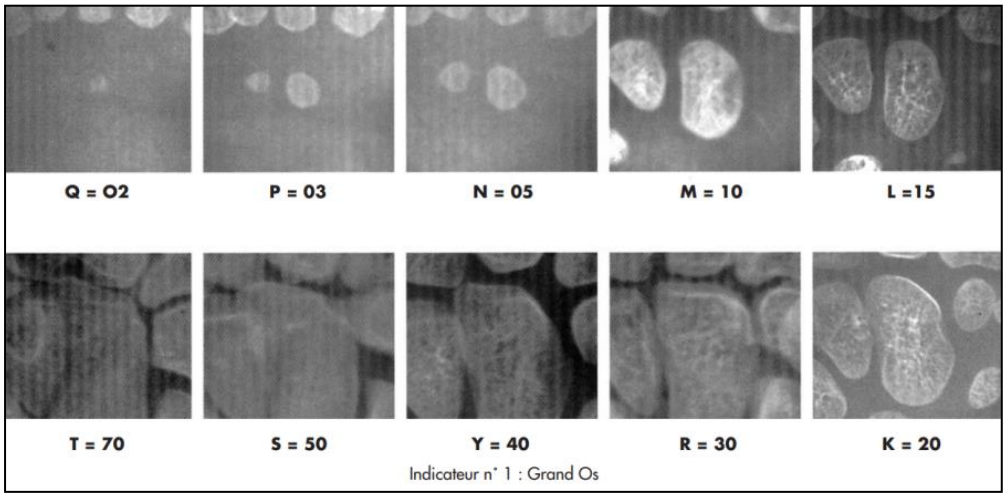


Figure 101 : L'os capitatum : les trois étapes d'auxogénèse (Q, P, N), de morphogénèse (M, L, K) et d'arthrogénèse (R, Y, S, T) d'après Sempé [23]

a. L'auxogénèse :

Désigne la formation de la structure osseuse [23], lorsque les phénomènes initiaux de la croissance volumétrique sont au premier plan [23, 24, 133], irradiant en quelque sorte du point d'émergence (de l'artère nourricière) [133] pour occuper le modèle cartilagineux préexistant et implicite de l'indicateur [24, 133].

En fait, ce stade, après le degré O [24], est formé de trois degrés : Q, P, N [23, 24]. Pendant ce stade, le phénomène d'ossification commence au centre de l'osselet, repéré facilement sur le cliché radiographique, sous la forme d'un « point » dont les contours, d'abord flous (Q), vont se densifier pour devenir rapidement bien visibles (P). Ce « point d'ossification » évolue de façon centrifuge et va occuper ensuite progressivement tout le volume de la maquette cartilagineuse (N) à la fin de ce premier stade d'auxogénèse [23].

Ainsi, pendant cette étape, l'évaluation de la maturation, consistera à apprécier les variations de volume du point d'ossification, ce qui permet une quantification facile selon les degrés Q, P, N [23].

Seule cette étape peut être évaluée par d'autres techniques que la radiographie standard, comme l'absorptiométrie ou l'IRM [23].

b. La morphogénèse :

Elle donne à l'osselet une forme adaptée à sa fonction [23].

Pendant ce stade, certaines zones de l'indicateur se développent de manière privilégiée soit en expansion, soit en retrait, soit en

superposition, ce qui tend à donner une idée des reliefs construits [133.

Les éléments maturatifs sont alors appréciés sur des modifications de forme de l'osselet [23, 24] avec apparition de reliefs osseux et de lignes denses, bien visibles sur une radiographie de bonne qualité [23].

Ce stade comporte trois degrés : M, L, K [23, 24].

c. **La synostogénèse** ou **l'arthrogénèse :**

Pendant la synostogénèse, les épiphyses vont se souder aux métaphyses [23, 24, 133], la physe ou zone d'accroissement disparait par ossification terminale des travées [133] ; l'arthrogénèse permet l'articulation des osselets entre eux [23, 24, 133] comme pour les os courts du carpe [23, 133], aboutissant à l'aspect adulte [23].

Ce stade est composé de trois degrés : R, S, T [23, 24]. Les degrés R (redressement, recourbement, relèvement), puis S (se soudant mais non encore soudée) et T (terminaison) de l'ossification [132].

Au total, le phénomène maturatif est composé de trois étapes décrivant ainsi, pour tous les indicateurs (sauf le pisiforme et les sésamoïdes), 10 degrés codés par 10 lettres, dont l'ordre est mnémotechnique : O, Q, P, N, M, L, K, R, S, T [24].

Comme aussi, ces indicateurs (sauf le pisiforme et les sésamoïdes) peuvent passer par dix-sept aspects différents, mais enchaînés, caractérisés par les lettres suivantes auxquelles correspond une valeur numérique particulière selon l'osselet ou l'épiphyse, mais avec quelques regroupements [134].

Les lettres V, W, U, X, Y, J sont des intermédiaires dont la position sera toujours la même [134] :

- **O** / **I** : signant le tout début de l'apparition de l'ostéogénèse ;
- **Q** / **P** / **N** et **V** : traduisant la première phase d'auxogénèse ;
- **M** et **W** / **L** et **U** / **K** et **X** : caractérisant la phase de morphogénèse ;
- **R** et **Y** / **S** et **J** / **T** ou **Z** : lors de la phase d'arthrogénèse ou de synostogénèse.

Le total général est de 0 % par définition au début (aucune visibilité d'ossification des indicateurs) et de 100 % par convention lorsque la maturation squelettique est entièrement terminée [134].

Les totaux partiels atteignent 50 % pour les os du carpe et 50 % pour les épiphyses des os longs [133, 134] (dont 15 % pour le radius et l'ulna, 15 % pour le pouce et 20 % pour la main) [134]. Ainsi, « Les images radiologiques ont été converties en un pourcentage » [134].

N.B. : chez les enfants les plus jeunes, la seule lecture du carpe en omettant la lecture des épiphyses distales peut aboutir à une sous-évaluation de la maturation osseuse [23].

(2) La méthode de Sempé utilise des radiographies du poignet et de la main gauches [133].

Pour une lecture correcte et uniforme du cliché, le lecteur doit suivre les instructions suivantes :

a. Fournir des « critères de qualité » de la prise du cliché radiographique est une exigence indispensable pour réaliser une évaluation précise de la maturation de tous les indicateurs osseux [23] :
   - La radiographie doit être de bonne qualité et suffisamment contrastée pour repérer facilement certains critères maturatifs ;
   - Le cliché est réalisé à taille réelle, sans agrandissement ni réduction, afin de permettre une surveillance précise de l'évolution des volumes osseux ;
   - Le pouce est à droite, bien dégagé des autres doigts ;
   - La paume à plat, sur le même plan que le poignet et la totalité de l'avant-bras ;
   - Le poignet et la main gauche sont au complet, sans omettre les phalanges distales ou les métaphyses du radius et de l'ulna ;
   - La radiographie est centrée sur la tête du troisième métacarpien et l'axe vertical passe, de bas en haut, par le radius, le lunatum, le capitatum, le troisième métacarpien, puis par les trois phalanges du médius.
b. Pour sa lecture, le cliché radiographique est orienté comme suit : les phalanges vers le haut et le pouce à droite de la main [133] ;
c. Chaque indicateur osseux (osselets, sésamoïdes, épiphyses) est repéré sur le cliché déjà orienté [133] ;
d. L'ordre de lecture est toujours le même [133] ;
e. La lecture tient compte : du **volume** osseux projeté sur le plan du film, des **structures** plus ou moins systématisées de chaque indicateur et des **connexions** établies ou en cours d'accomplissement selon le secteur en cause [133] ;
f. Pendant la lecture, tous les aspects rencontrés se superposent aux images de référence désignées par une lettre ou semblent se situer entre deux de ces images [133] :

   O // **Q** - **P** - **N** // **M** - **L** - **K** // **R** - **S** - **T** /

g. Quand cette apparence est confirmée ou lorsqu'il y a doute, il importe de ne pas tergiverser et d'utiliser les degrés intérimaires (indiqués entre parenthèses) en essayant de ne pas s'en servir systématiquement [133] :

   O / (I) // **Q** / **P** / **N** / (V) // **M** / (W) / **L** / (U) / **K** / (X) // **R** / (Y) / **S** / (J) / **T** // Z

(3) La méthode de Sempé repose sur une analyse qui porte sur les 33 indicateurs osseux de la maturation squelettique du poignet et de la main, ce

nombre est ramené à 22 susceptibles de se voir attribuer une valeur numérique [134]. Ce sont [23, 24, 134] :

- Les 8 os courts du poignet ou os du carpe (capitatum, hamatum, triquétrum et pisiforme, lunatum, scaphoïde, trapèze, trapézoïde) ;
- Les 2 épiphyses distales des os longs du poignet, le radius et l'ulna ;
- Les 3 épiphyses des trois os de la colonne du pouce (épiphyses proximales du premier métacarpien, de la phalange proximale et de la phalange distale), avec les 1+1 sésamoïdes du pouce (qui ne sont comptés que pour 1) ;
- Les 8 épiphyses (les épiphyses distales des métacarpiens et les épiphyses proximales des phalanges) des quatre os de deux des quatre doigts de la main (médius et auriculaire).

L'analyse précise de 22 des 33 indicateurs osseux d'une radiographie du poignet et de la main gauches de face, suit un ordre de lecture qui est toujours le même et ce d'autant plus qu'il correspond à l'ordre d'apparition habituel des centres d'ossification. Elle se fait comme suit [23, 24] :

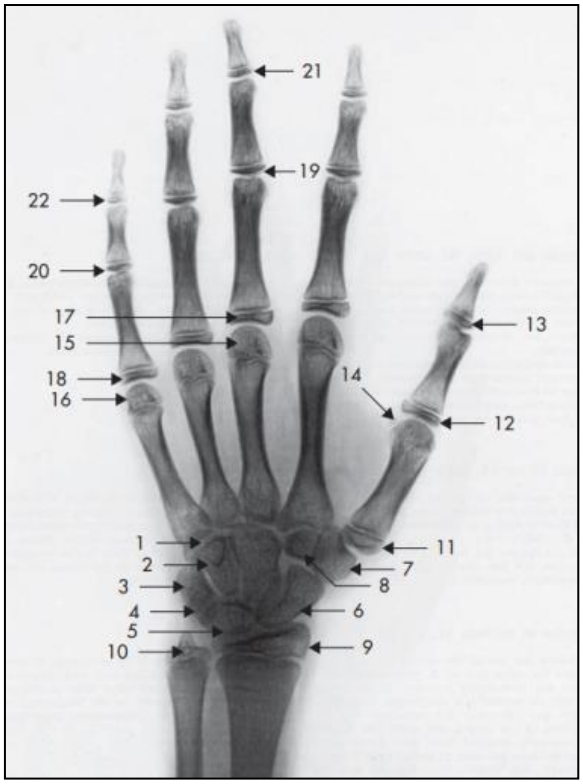


Figure 102 : Radiographie de Nathalie à l'âge de 12 ans. Emplacement des indicateurs de Maturation. Atlas de la maturation squelettique du poignet et de la main (Sempé M., Pavia C.) [23]

- **Les os courts du poignet (carpe) :** seront lus dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, en commençant toujours par le capitatum (1), puis l'hamatum (2), le triquétrum (3), le pisiforme (4), le lunatum (5), le scaphoïde (6), le trapèze (7) et le trapézoïde (8) ;

- **Les épiphyses des os longs du poignet :** radius (9) et ulna (10) en ne négligeant pas l'examen de toute la métaphyse ;
- **Le pouce :** métacarpien (11), première phalange (12), deuxième phalange (13) et sésamoïdes 1 et 2 (14) ;
- **Le médius** et **l'auriculaire** : en s'attachant d'abord aux métacarpiens (15 et 16), puis à la première phalange (17 et 18), à la deuxième (19 et 20) et enfin à la troisième (21 et 22).

N.B. : L'index et l'annulaire ne seront pas décomptés pour équilibrer l'apport du carpe et des os longs [23].

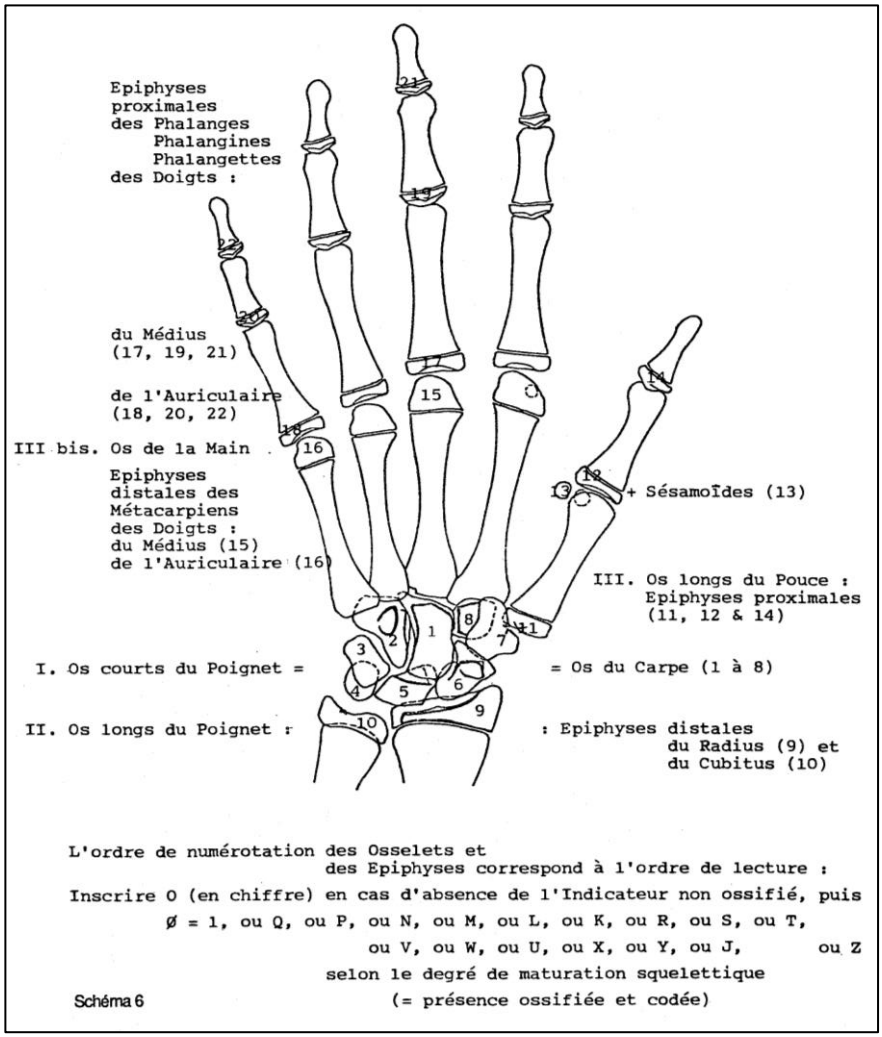


Figure 103 : Ossification du poignet et de la main gauches : emplacement des indicateurs de maturation retenus (n=22) [137]

(4) Après avoir calculé l'AC exact de l'enfant au moment de la radiographie à évaluer, on la compare aux images de l'atlas, en commençant par la radiographie de référence proposée pour cet AC de l'enfant à étudier. Cette démarche de comparaison d'une radiographie à évaluer à des images de référence, permet de dépister facilement un décalage de la maturation osseuse, soit dans le sens d'une avance soit dans le sens d'un retard [23].

Les indicateurs osseux sont examinés dans l'ordre décrit ci-dessus, en commençant toujours par le capitatum (1) et en terminant par les épiphyses des phalanges distales (21 et 22), ce qui permet de ne rien oublier et d'utiliser des fiches préétablies (réglette EMS ou logiciel) [23].

On décrit 10 degrés de maturation pour chaque indicateur, sauf pour le pisiforme et les sésamoïdes [23]. La mémorisation de chacun des degrés de maturation concernés est aidée par le texte explicatif qui accompagne les images et les schémas de référence [133].

Quand deux degrés contigus (M et L, ou Q et P, etc.) se succèdent d'une radiographie à l'autre, on peut utiliser les demi-degrés (c'est leur rôle) et l'erreur potentielle ne sera justement que de ce demi-degré [132].

A chaque degré maturatif, correspond une « note » de maturation adaptée, qui sera attribuée [23, 24].

À la fin de l'examen, l'addition de toutes les « notes » permet d'obtenir le pourcentage exact de maturation squelettique [23, 24].

Les totaux numériques ainsi obtenus transcodent en quelque sorte les manifestations de la maturation squelettique et fournissent une note allant de 0 à 999. Au lieu d'une approximation chronologique utilisant la notion si imprécise d'âge, il est assurément plus satisfaisant de disposer d'un ensemble de chiffres, et de ses sous-ensembles, pour situer le niveau de progression de la maturation des indicateurs [137].

Le résultat de l'évaluation de la maturation osseuse est exprimé sous l'intitulé de « l'âge de l'enfant de la radiographie de référence qui se rapproche le plus de celle à étudier !! » encore appelé de façon impropre « âge osseux » en sachant de plus qu'il est quasiment impossible de trouver un cliché totalement à l'identique et qu'il faut parfois faire une sorte de « moyenne » entre deux images de référence [23].

Enfin, la quantification de cette maturation pourra être exprimée sous la forme de courbes de maturation squelettique, celles-ci pouvant être modélisées afin de développer des modèles mathématiques, pouvant être utilisés en recherche clinique [23].

5- Maturos

Des logiciels ont été créés afin de faciliter la détermination de l'AO en pratique quotidienne [62], parmi ceux-ci, le « MATUROS » qui a été développé en utilisant la méthode numérique d'évaluation de la maturation squelettique de Michel Sempé [24].

Grâce à la coopération du Laboratoire d'Analyse de Données et Biométrie de l'Université Claude Bernard à Lyon, un logiciel avait été réalisé, fonctionnant sur microordinateurs Macintosh ou PC compatibles et nommé « Maturos » [134].

En fait, la présentation du logiciel « Maturos » diffusé par les laboratoires Serono, du groupe Arès-Serono, qui s'en sont portés acquéreurs dès 1988 en Espagne, était une heureuse démarche scientifique : il s'agit de valoriser une recherche appliquée qui, sans eux, n'aurait eu aucun moyen de vous parvenir, mais, par là même, occulte la conduite qui en a permis la réalisation et qui remonte à quarante années au moins [134].

Le premier logiciel Maturos, édité en 1988 [24], et développé par Normand Pontier et Sempé [4, 124], afin d'automatiser la méthode de Sempé pour la rendre plus facilement accessible [23]. Ce logiciel est basé sur l'appréciation morphologique de la maturation de 22 points d'ossification de référence au niveau du poignet et de la main gauches, et en fonction de cette appréciation, un score de maturation est proposé avec un équivalent en AO [4]. L'automatisation des calculs a facilité l'accès à la méthode [24].

Il a ensuite été montré, qu'il n'y avait pas de procédure d'apprentissage pour un étudiant en médecine qui n'avait jamais utilisé le programme et qu'il n'y avait pas de différence significative entre ses résultats et ceux de l'auteur de la méthode [24].

Maintenant, le Maturos semble d'utilisation facile grâce aux nouvelles fonctions « d'aide au diagnostic » [24] en proposant des exemples, ce qui rend l'apprentissage des différents stades maturatifs avec ce logiciel utile [23]. En fait, cette fonction est une véritable aide au diagnostic, au pronostic et à la surveillance thérapeutique appréciable [24, 134], en endocrinologie et en radiologie pédiatrique mais également dans d'autres spécialités s'intéressant à la maturation squelettique de l'enfant comme [24] l'orthopédie pédiatrique, l'orthodontie [24, 134], la médecine du sport [24] et l'orthodromie [134], c'est-à-dire dans tous les cas où des performances physiques sont attendues non seulement médicalement, mais aussi dans le cadre scolaire ou en rééducation fonctionnelle [134]. Il peut être un outil incontournable en recherche clinique [24].

Le CD Rom « Maturos 4.0 », outil d'évaluation de la maturation squelettique, a pour objectif de proposer une évaluation de la maturation squelettique qui soit précise, rapide, reproductible [24, 124], mais également facile et conviviale, et encore plus dans la méthode simplifiée [24]. Il permettait la détermination très rapide des pourcentages des degrés de maturation squelettique recherchés à partir de toutes les radiographies du poignet et de la main recueillies quelle que soit leur provenance ou leur destination [134].

(1) Description :

Le CD Rom MATUROS 4.0, dernière version du Logiciel qui a été éditée en 2001 [42], apporte de nouvelles possibilités [24].

Deux méthodes d'analyse de la radiographie du poignet et de la main gauches sont proposées [24, 121], (a) la méthode classique utilisant les 22 indicateurs

[24, 121, 124] et (b) une méthode simplifiée (J. Pontier) sur les 10 les plus représentatifs en fonction de l'AC [24, 121].

Pour chacune des deux méthodes [24], le logiciel propose des schémas de référence [24, 124] à comparer à la radiographie à analyser afin de déterminer le stade maturatif de l'indicateur osseux étudié [24]. Ces schémas sont annotés par des descriptions précises du noyau analysé [124].

Pour faciliter l'examen, le logiciel présente les 3 degrés maturatifs les plus probables, chacun sous 3 formes différentes : schéma descriptif, texte explicatif et « mini » radiographie de référence [24].

Lorsque les 22 indicateurs (ou les 10 dans la méthode simplifiée) ont été analysés, le logiciel calcule immédiatement les résultats et donne le pourcentage de maturation squelettique et l'« équivalent âge osseux ». Il dessine alors la courbe de maturation squelettique [24].

(2) Mode d'emploi du CD Rom « MATUROS 4.0 » : [23, 24]

- Le cliché radiographique doit être orienté avant son analyse : poignet en bas et pouce à droite ;
- Ouverture du logiciel, étant installé dans un PC : l'analyse est «lancée» ;
- Le médecin indique alors comme requis sur le premier écran : nom, prénom, date de naissance et sexe du patient. II précise ensuite le nom de l'examinateur (plusieurs examinateurs pouvant utiliser le même logiciel), le type d'analyse complète (22 indicateurs) ou simplifiée (10 indicateurs) et la date de la radiographie à analyser ;

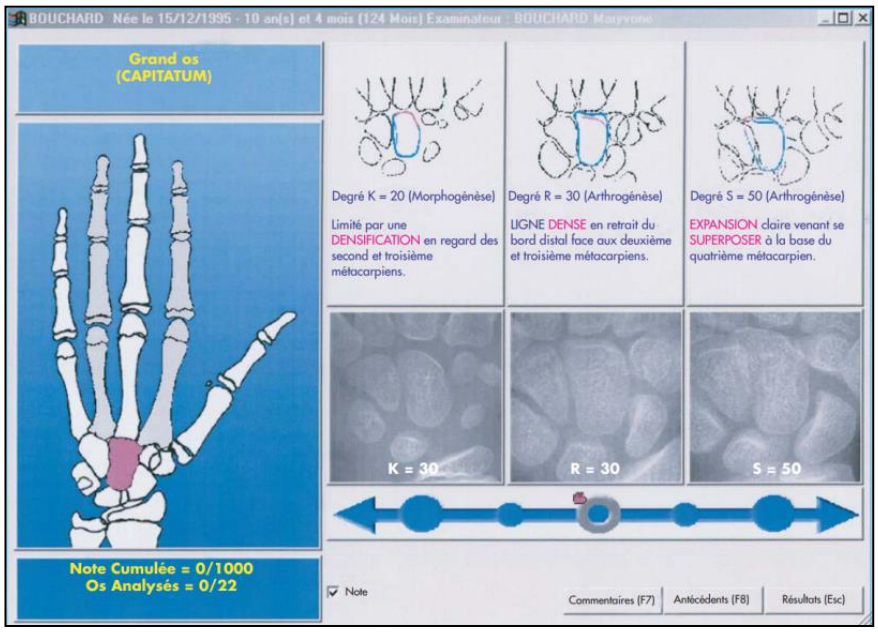


Figure 104 : Ecran Maturos 4.0 : analyse du capitatum. Schémas et images proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture [23]

- Le deuxième écran propose alors l'analyse du premier indicateur osseux, le capitatum. Son analyse, facile le plus souvent, doit être la plus précise possible. Pour ceci, le logiciel propose les 3 degrés maturatifs les

plus probables en fonction de l'AC de l'enfant. On peut faire apparaitre les degrés voisins s'ils semblent plus appropriés, à l'aide de la souris ou des flèches du clavier. Le médecin détermine alors le degré maturatif, en comparant la radio de l'enfant aux images de références du logiciel ; Pour faciliter l'examen, 3 présentations sont proposées pour chaque degré : schéma descriptif, texte explicatif et « mini » radiographie de référence. L'examinateur « clique » alors le degré retenu sur la bande de déroulement. Ce degré maturatif, codé par une lettre (O, Q, P, N, M, L, K, R, S, T,) correspond à une note qui est enregistrée par le logiciel pour permettre le calcul du pourcentage de maturation squelettique ;

- Cette procédure est ensuite répétée dans l'ordre requis par le logiciel, pour chacun des 22 indicateurs sélectionnés dans l'analyse complète ou seulement pour 10 dans l'analyse simplifiée ;
- Lorsque l'analyse est terminée, le logiciel intègre automatiquement les notes enregistrées pour chaque degré et effectue les calculs qui permettent d'obtenir le pourcentage de maturation squelettique [23, 24] allant de 0 % à la naissance à 100 % à l'âge adulte, résultat qui peut ensuite être converti si nécessaire en équivalent « AO » ;

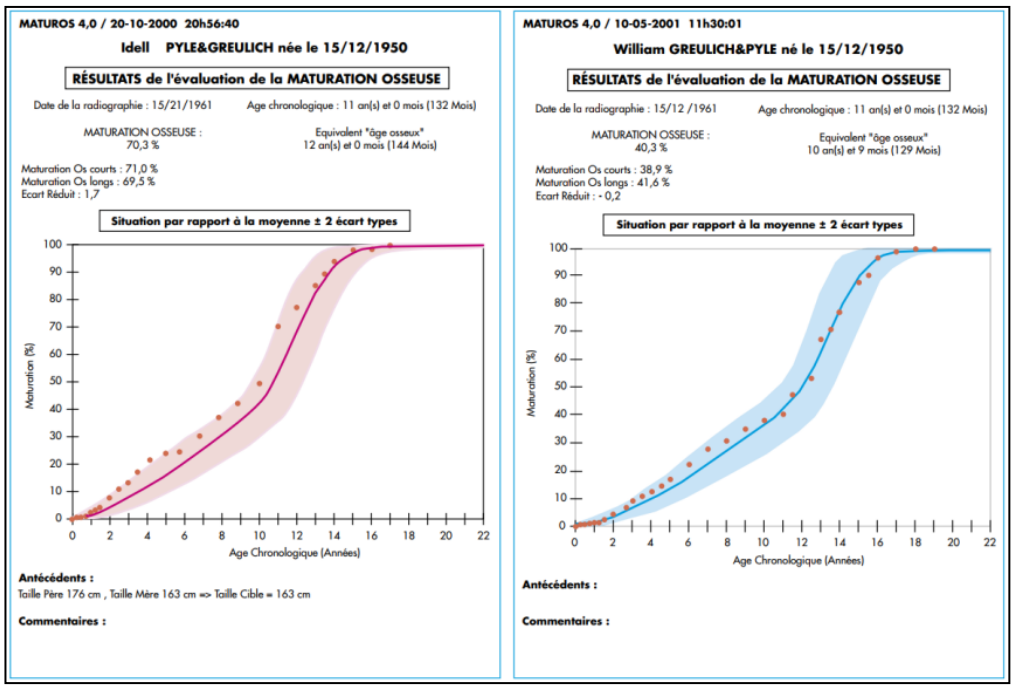


Figure 105 : Analyse des filles et des garçons de l'Atlas de GP selon Maturos : il existe un sus-décalage de maturation chez les jeunes Américains dans les deux sexes. Chez les filles, la radio de 11 ans est évaluée à pratiquement 12 ans [23]

L'expression en pourcentage permet la réalisation de courbes de maturation osseuse [23, 24] (m +/- 2 σ) permettant de mieux repérer la situation de l'enfant par rapport à la moyenne pour l'âge. Lorsque plusieurs évaluations sont faites chez un même enfant, la mémoire des examens précédents permet un suivi longitudinal.

6- Avantages :

- La méthode de Sempé est l'une parmi les méthodes numériques les plus précises [135].
- La méthode de Sempé, le logiciel Maturos et sa méthode simplifiée semblent actuellement plus adaptés dans l'évaluation de la maturation pour les enfants européens, surtout en période pubertaire [24].
- L'Atlas de Sempé-Pavia intègre la notion d'évolution longitudinale, c.-à-d. ce sont les mêmes enfants qui sont suivis de la naissance à l'âge adulte, et donc le principe de « standards » est basé sur des critères objectifs [24].

7- Critiques :

- Le logiciel Maturos présente l'intérêt d'obtenir une évaluation précise de la maturation, mais reste long à utiliser [124] : 10 minutes [89] à 15 minutes par enfant [124]. Cette méthode de lecture de l'AO allonge de façon très importante le temps de lecture sans apporter un gain significatif de précision [39, 89], et n'est pas passée en pratique clinique courante [89].
- L'analyse d'une série de 60 enfants indemnes de toutes pathologies hormonales a montré une discordance entre l'AO mesuré à la main (Maturos™) et l'AC, supérieur à 12 mois dans 30 % des cas [87].
- La tendance à l'allongement des durées de terminaison de l'ossification, fait que le décalage positif est plus grand que l'inverse. C'est cette tendance asymptomatique au décalage positif, pour ne pas parler de retard, qui a illusionné l'informaticien responsable du programme « Maturos 4 » en l'amenant à fixer 100 % de maturation complète au niveau du poignet et de la main à un âge absolument excessif : 30 ans aussi bien chez les femmes que chez les hommes ; c'est en réalité 20 ans et 22 ans qui auraient pu être proposés [135].
- En ramenant l'épiphyse radiale, la dernière à se fusionner définitivement, à son demi degré (S+) immédiatement antérieur, les résultats se modifient radicalement : 18 ans 6 mois chez l'un et l'autre sexe, ce qui n'est pas non plus acceptable. Un tel gain en AC pour un demi degré traduit bien la faillite du logiciel pour exprimer la maturation terminale, mais aussi la difficulté inhérente pour une telle définition : il est, en effet, impossible de se procurer des radiographies témoins en nombre suffisant à ces âges chronologiques et la projection extrapolée en « âges » prétendument « osseux » est finalement moins expressive que le pourcentage, mais ce pourcentage ne peut être rigoureusement centré sur un AC [135].
- Le point repère sur la courbe de référence conserve une position neutre à 18 ans, ce qui est une autre défaillance du programme. Ainsi, pour les deux ou trois demi degrés généralement en cause dans la phase finale habituelle de la maturation squelettique des filles et des garçons, il n'est pas possible d'être entièrement affirmatif [135].

- Les incertitudes de l'analyse, un léger décalage dans la structuration d'un ou de plusieurs indicateurs, l'inertie du logiciel « Maturos 4 » à ce degré ultime de sa méthode, interdisent de ne pas se donner une assez importante marge de variation, qui est physiologique en elle-même [135].

Conclusion :

La méthode d'évaluation de la maturation de Sempé, apparait comme entièrement originale puisqu'elle repose sur une analyse longitudinale d'un très grand nombre de clichés radiographiques d'enfants français en bonne santé. Cette méthode, développée ensuite avec un maximum d'exhaustivité, a également permis la réalisation d'un atlas de type « longitudinal » (Sempé et Pavia, 1979 Lyon, Barcelone). En effet, les radiographies de 4 filles et de 3 garçons sont présentées de la naissance à la fin de la croissance. Ceci permet de mieux appréhender la dynamique longitudinale de la maturation [24].

Par la suite, le développement d'outils mathématiques (modélisation des courbes) et informatiques (MATUROS 1.0, 1988) ont facilité l'abord de la méthode numérique, MATUROS 4.0 CD en étant l'évolution actuelle [24].

IV.2.4. Autres méthodes utilisant la radiographie du poignet et de la main gauches

Elles sont moins fréquemment utilisées, et nous allons seulement citer les plus rencontrées dans la littérature :

IV.2.4.1. Méthode de FELS

Editée par : Alexander Francis Alex ROCHE (1921–2017), William Cameron CHUMLEA et David THISSEN (né vers 1950), la méthode de Fels, appelée aussi, « Fels hand wrist method », est facile à apprendre et rapide à appliquer pour évaluer la maturation squelettique de la main et de poignet [119].

Elle a été conçue pour produire des estimations de la maturité squelettique et de l'âge qui sont plus objectives et certainement plus représentatives des schémas de maturation modaux américains que celles provenant des méthodes GP ou TW2 [119]. Cette méthode ne semble pas très répandue, d'après le peu d'articles recensés dans la littérature comparativement à GP ou TW [67].

IV.2.4.2. Méthode d'Acheson

Editée par l'épidémiologiste britannique ACHESON Roy Malcolm (1921-2003).

IV.2.4.3. Méthode de Björk

Elle est éditée en 1972 par Erik Arne BJÖRK (1911-1996) [57]. Les 16 indicateurs de maturation squelettique selon Björk sont détectés au niveau des doigts (évalués en fonction de leur relation entre l'épiphyse et la diaphyse), des os du carpe et du radius [57].

IV.2.4.4. Méthode de Schmidt et coll.

Décrite en 2008, Sven-Christian SCHMIDT et coll.

IV.3. Les méthodes basées sur la radiographie des autres segments du squelette appendiculaire

Le choix du poignet et de la main est désormais reconnu comme le seul valable [139]. Le poignet et la main gauches restent incontournables à tous les âges, étant la région anatomique la plus riche en indicateurs osseux et donc utiles dans l'estimation de la maturation osseuse. Par ailleurs, ils existent d'autres indicateurs osseux appartenant au squelette appendiculaire pourront être utilisés dans cette estimation, en fonction de besoins spécifiques [23].

Rappelant ce que Sempé a écrit : « Ce sont toutes les articulations des membres qui ont été prioritairement mises à contribution pour évaluer la maturation osseuse » [139]. Ce présent titre va s'intéresser aux articulations et aux os concernés par les méthodes d'estimation de l'AO, autres que le poignet et la main. Citons essentiellement : la clavicule, le coude, la crête iliaque, le genou, le pied, les épiphyses distales de l'avant-bras et de la jambe, l'hémisquelette, le second métacarpien et l'os sésamoïde du pouce.

IV.3.1. Les méthodes basées sur la maturation de la clavicule

La clavicule est l'os qui termine sa maturation en dernier [35]. Cette maturation concerne le développement de son extrémité médiale ou sternale [4, 35, 67]. L'apparition et l'ossification du centre épiphysaire médiale, situé au niveau de l'extrémité sternale, ont lieu entre 16 et 26 ans [35, 131].

L'étude de la maturation claviculaire défend deux intérêts intriqués :

- La détermination de l'âge dans la pratique médicolégale [4, 35, 81], puisque son l'évolution morphologique de la clavicule correspond aux paliers juridiques des âges [81].
- La détermination de la maturité, si un individu est majeur ou non, puisque quelques méthodes, telle l'Atlas GP, ne sont pas pertinentes au-delà de 16 ans [35]. Cette méthode permet d'affirmer un âge adulte (21 ans) chez le sujet vivant lorsque le dernier stade de maturation est atteint [67].

L'analyse de la clavicule est faite sur une radiographie simple ou une TDM [4, 12, 35, 131]. Techniquement parlant, si l'analyse de la clavicule est réalisée avec la radiographie de thorax (cliché standard en incidence postéro-antérieure), cette technique nécessite l'absence des superpositions trop importantes de structures anatomiques sur les extrémités sternales des clavicules, sinon des clichés complémentaires sont nécessaires telle la réalisation d'une seconde incidence radiologique oblique. Cette possible difficulté technique est abolie en cas d'utilisation de la TDM [67].

(1) Etude radiographique de la maturation claviculaire :

Schmeling et coll., en 2004, ont étudié l'ossification de la partie sternale de la clavicule sur 699 radiographies de thorax (456 F / 243 M) d'un échantillon

représentatif de la population allemande. Ils proposent une classification en 5 stades de maturation [67] :

- **Stade 1 :** Pas de centre d'ossification
- **Stade 2 :** Apparition du centre d'ossification
- **Stade 3 :** Centre d'ossification partiellement ossifié
- **Stade 4 :** Centre d'ossification entièrement ossifié
- **Stade 5 :** Fusion de l'extrémité sternale au corps et disparition complète de la ligne de fusion épiphysaire

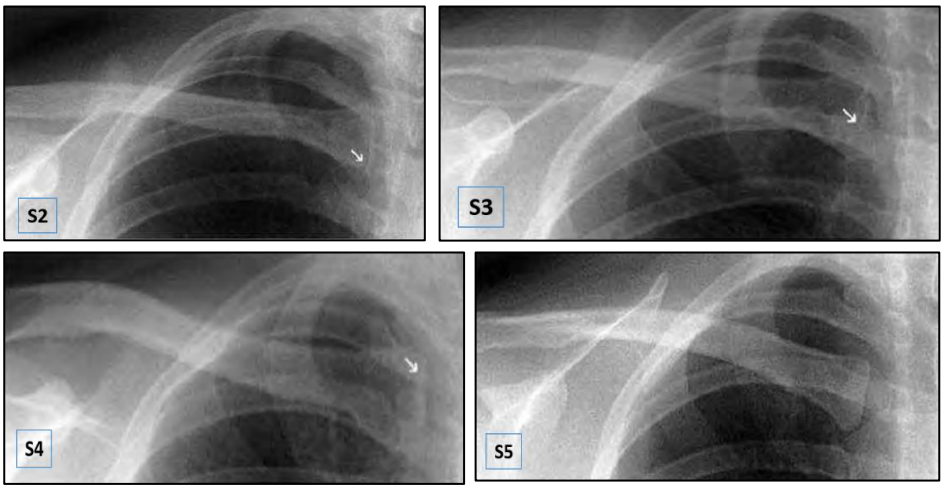


Figure 106 : Les stades « radiologiques » de maturation de l'extrémité sternale de la clavicule, selon Schmeling et coll. [67]

(2) Etude scannographique de la maturation claviculaire :

L'évaluation tomodensitométriques des stades d'ossification de l'extrémité sternale de la clavicule dégage quatre stades [35, 131] (Tab. 33) :

Tableau 33 : Âge chronologique et maturation claviculaire [131]

Stade métaphyso-épiphysaire	Âge moyen d'apparition	Âge d'apparition — Intervalle de confiance 95 %	Tranche d'âge la plus fréquente
Stade I	≤ 16 ans	0-16 ans	≤ 12 ans
Stade II	16,1 ans	12,3-19,9 ans	14-18 ans
Stade III	20 ans	16,5-25,5 ans	19-23 ans
Stade IV	≥ 22 ans	Au-delà de 22 ans	≥ 24 ans

Schulz et coll. ont pu montrer un excellent accord entre la technique radiographique standard et la TDM : 97 cas sur 99 classés de la même manière ; pour les 2 cas discordants, la TDM donnait un stade 2 alors que la radiographie suggérait un stade 3 [67].

Schulz et coll. ont décrit l'aspect TDM des 5 stades de maturation de l'extrémité médiale de la clavicule, et conclu que cette dernière était le mieux visualisée en fenêtre osseuse [67].

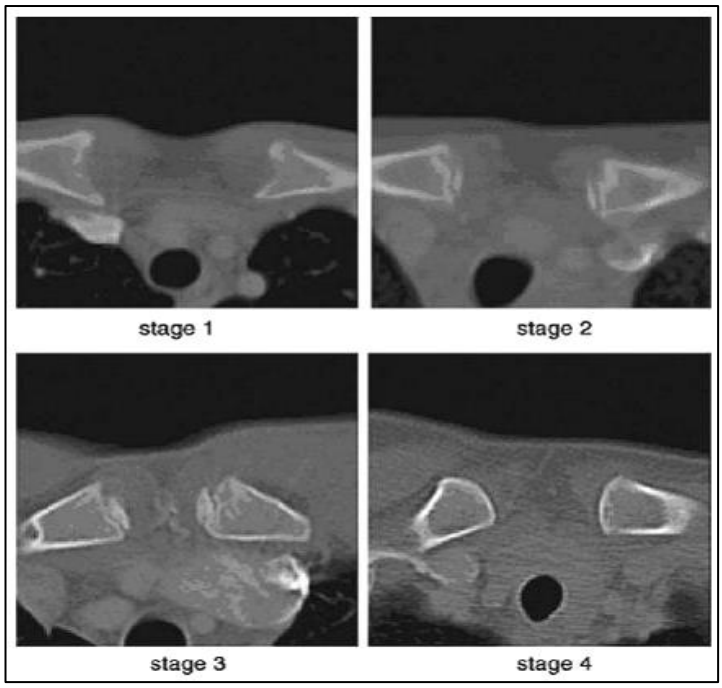


Figure 107 : Aspect TDM des stades de maturation claviculaire, d'après Schulze et coll. (S1) absence de point d'ossification épiphysaire ; (S2) point d'ossification, pas de signe de fusion ; (S3) ossification épiphysaire avec fusion ; (S4) fusion épiphyso-métaphysaire complète [67]

IV.3.2. Les méthodes basées sur la maturation du coude

Utilisées pour estimer l'âge osseux en période péri-pubertaire, les méthodes basées sur la maturation du coude servent comme complément des méthodes reposant sur la radiographie de la main et du poignet [4, 36].

1. Méthode de Sauvegrain et Nahum :

L'estimation de la maturation squelettique au niveau du coude se faisait par une méthode quantitative en se reportant aux abaques établis en 1962 par J. SAUVEGRAIN, H. NAHUM et H. BRONSTEIN [134]. Elle est de réalisation facile et rapide [36, 86, 134] et de lecture relativement facile et reproductible [87].

Cette méthode fait appel à un système de cotation [86, 124] en fonction de la maturation des différents points d'ossification au niveau du coude [124, 131].

Elle est souvent utilisée en complément des méthodes reposant sur la radiographie de la main et du poignet pour estimer l'AO en période péri-pubertaire [4, 36, 134]. Cette tranche d'âge pour laquelle s'applique la méthode de Sauvegrain et Nahum correspond à une période durant laquelle les noyaux d'ossification du coude vont subir des changements morphologiques importants, ce qui permet une détermination avec des intervalles de l'ordre de 6 mois, alors que l'étude de la main et du poignet est assez imprécise dans cet intervalle [36].

Principe et technique :

La méthode de Sauvegrain et Nahum est basée sur une radiographie du coude gauche, face et profil [4, 36, 53, 54, 87, 121, 124].

Les auteurs ont retenus quatre indicateurs ou régions, sous forme de quatre séries de schémas sans aucun texte explicatif [4, 36, 67, 121, 132] :

- Le massif capitulo-épicondylien latéral (capitulum associé à l'épicondyle latéral) : vu de face, coté de 1 à 9 ;
- La trochlée : vue de face, cotée de 1 à 5 [l'épicondyle médial n'est pas analysé] ;
- L'olécrane : vu uniquement de profil, coté de 1 à 7 [avec ses deux fragments constitutifs] ;
- La tête radiale : vue de face et de profil, cotée de 1 à 6.

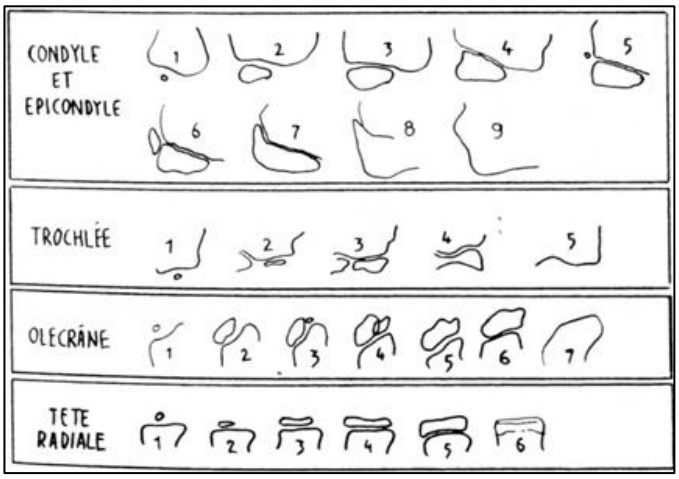


Figure 108 : Ossification des os du coude selon Sauvegrain et coll., les indicateurs et leurs cotes [36, 67]

2. Méthode de Craviari et Sempé :

La méthode de Sauvegrain et Nahum est la plus connu et la plus ancienne [86], elle peut être optimisée par la méthode décrite par Craviari et Sempé [87].

Cette dernière a été proposée par Thierry CRAVIARI (né en 1965), Michel SEMPÉ (1930-2020) et al., elle comporte une transformation de la méthode de détermination de la maturation squelettique au niveau du coude, exprimée par une note sur 27, décrite par Sauvegrain, Nahum et Bronstein (SNB) [45].

La présente méthode est simple et reproductible, avec une meilleure précision due à l'augmentation des indicateurs de maturation et à l'intégration d'aspects transitionnels [45]. En effet, les auteurs utilisent sept indicateurs de maturation cotés selon les critères de Sempé [23, 45] : capitulum, épicondyle latéral, trochlée, épicondyle médial, centres olécraniens inférieur et supérieur et tête radiale. Le total obtenu est reporté sur une courbe qui, en fonction du sexe, donne l'équivalent « âge osseux » correspondant [45].

Cet « AO », qui n'est qu'une moyenne, obtenu est parfaitement corrélé a l'« AO » du poignet et de la main, déterminé par le logiciel MATUROS® [45].

IV.3.3. La méthode basée sur la maturation de la crête iliaque

Très connue sous le nom de « méthode de Risser » ou « test de Risser » ou « signe de Risser », éditée en 1958 par Joseph C. RISSER (1892–1982) [77].

Le test de Risser est très classique [121], évaluant la calcification de l'aile iliaque [87]. Il nécessite une radiographie de face du bassin, ou du rachis avec les crêtes iliaques [121].

Risser a observé que l'état d'ossification de la crête iliaque était associé à l'état de maturité du squelette rachidien d'un patient, après des études il conclut que « la fixation de la crête iliaque s'est avérée être un excellent signe physiologique pour indiquer l'achèvement de la croissance vertébrale » [77].

La méthode de Risser intéresse la tranche d'âge de 13 à 16 ans chez la fille et de 15 à 18 ans chez le garçon [53, 54, 86].

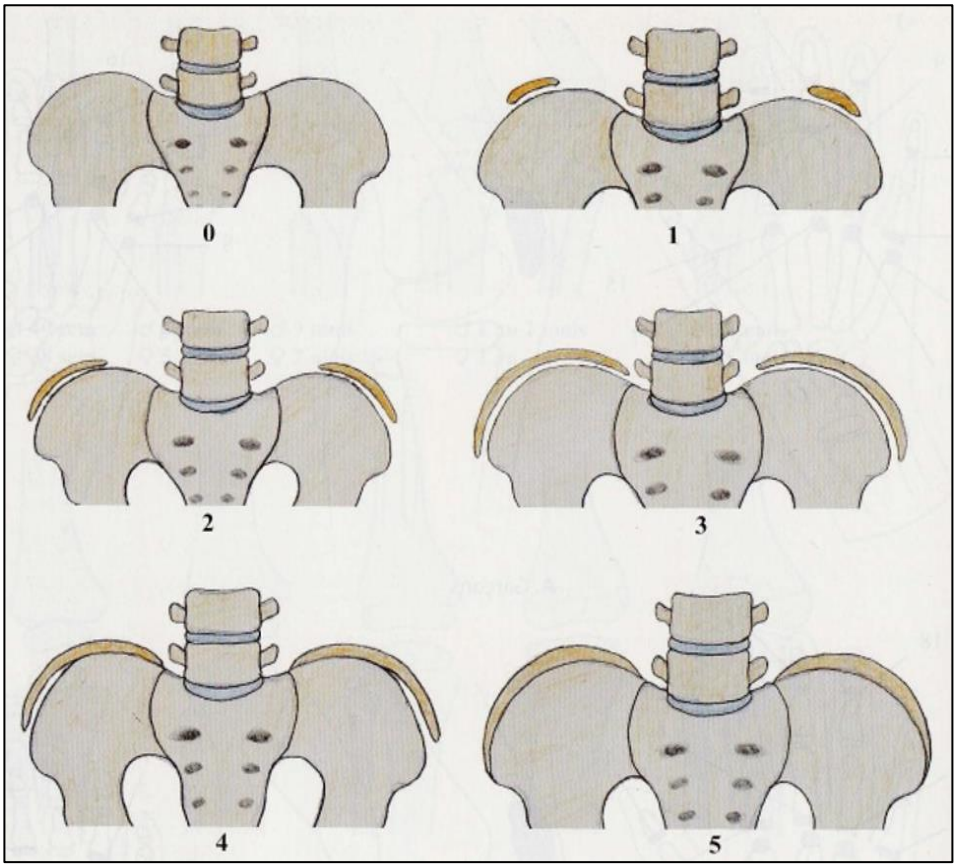


Figure 109 : Etapes d'ossification de la crête iliaque [121]

1. **Stades de Risser :**

Le Risser consiste à coter les crêtes iliaques [89, 121] de 0 à 5 selon le développement de leur noyau d'ossification [121]. Entre son apparition et sa fusion totale, et en fonction de la fusion de la crête iliaque avec l'os iliaque [135], le centre d'ossification des crêtes iliaques passe par six stades [77, 124].

Le stade 0 : décrit une radiographie sur laquelle aucune ossification n'est vue dans la crête iliaque [77, 124] ;

Le stade 5 : représente l'ossification complète et la fusion de la crête iliaque [77, 124], il traduit la fin de la maturation osseuse [4, 86, 89].

2. **Intérêt du Risser :**

Bien qu'il soit considéré comme grossier [87], le test de Risser est d'utilité certaine en pratique quotidienne en fin de croissance [4], il permet l'évaluation de la maturation vertébrale [23, 77, 87] et par conséquent, l'appréciation du risque potentiel évolutif d'une scoliose [4, 23, 77, 86, 87, 89].

En effet, les indications thérapeutiques de la scoliose dépendent du degré de maturation osseuse [4] : la fusion totale du noyau d'ossification des crêtes iliaques (stade 5) marque la fin de la maturation osseuse [4, 86, 89], et donc la fin de la période d'évolutivité majeure de la scoliose [87, 89], d'où l'arrêt envisagé de la prise en charge thérapeutique [87].

IV.3.4. La méthode basée sur la maturation du genou

Radiologiquement sur un genou de face : l'épiphyse distale du fémur est réputée visible trois mois avant la naissance à terme et l'épiphyse proximale du tibia serait visible un mois avant la naissance à terme [135], donc ces deux épiphyses sont visibles à la naissance [124]. L'atlas de Pyle et Hoerr (1955) donne l'AO déterminé au niveau du genou [23, 87, 121] avec une précision à un an près. Cette méthode est peu précise, mais, associée à une autre méthode, elle peut être utile dans le calcul des dates d'épiphysiodèse pour le genou [87].

IV.3.5. La méthode basée sur la maturation des épiphyses distales (avant-bras, jambe) [67]

K K BANERJEE et B B L AGARWAL ont évalué l'âge par rapport à deux dates importantes pour la médecine légale : 16 ans (majorité sexuelle) et 18 ans (majorité civile). Ils se sont basés sur le degré de fusion (complet ou incomplet) des épiphyses distales du poignet (radius, ulna) et de la cheville (tibia, fibula), sur des clichés radiologiques de 90 filles et 90 garçons indiens âgés entre 14 et 20 ans et vivant à Delhi.

IV.3.5. La méthode de Garn

En 1967, GARN et coll., à partir de l'ordre d'apparition de 73 points d'ossification, concluent que l'étude de 20 centres significatifs est plus judicieuse que l'étude d'une main ou d'un demi-squelette. Ces centres significatifs sont situés au niveau de la main (de face), du pied (de face), et du genou (de profil). Ces centres diffèrent dans leur pertinence et leur chronologie d'apparition entre garçons et filles. L'AO est estimé en prenant l'âge moyen du ou des centres significatifs les plus récemment apparus [121].

IV.3.7. La méthode de Lefebvre et Koifman

Editée en 1956, par Jacques LEFEBVRE et A. KOIFMAN [121]. Cette méthode permet l'estimation de l'AO d'après les radiographies d'un membre thoracique et d'un membre pelvien du même côté [4, 121], d'habitude le gauche [4].

IV.3.8. La méthode de Faruch Bilfeld et coll.

Parmi les méthodes de détermination de l'AO non utilisées dans la pratique quotidienne, une méthode quantitative focalisée sur l'étude du second métacarpien [62]. Cette nouvelle méthode quantitative a été testée par Marie FARUCH BILFELD et coll. pour évaluer l'AO chez 417 sujets (filles et garçons) caucasoïdes âgés de 2 à 20 ans [67].

IV.3.9. La méthode basée sur la maturation de l'os sésamoïde du pouce

La puberté est une période charnière pour la maturation osseuse. Elle débute un à deux ans plus tôt chez les filles (9-10 ans) que chez les garçons (12 ans). La vitesse de maturation n'est pas linéaire et il existe une accélération de la maturation l'année précédant la ménarche chez les filles [34].

L'os sésamoïde du pouce est visible sur l'Atlas de GP à partir de 11 ans chez la fille et 13 ans chez le garçon ; plus exactement, la date d'apparition de l'os sésamoïde dans l'Atlas est de 123,4 mois (soit 10,3 ans) chez la fille et 152,7 mois (soit 12,7 ans) chez le garçon [34].

Ce critère radiologique simple est souvent utilisé dans la pratique quotidienne comme un repère précis [34], pour d'autres, son apparition est un excellent indicateur du déclenchement de la puberté [67, 89]. En fait, l'apparition de l'os sésamoïde du pouce est un des critères d'analyse souvent utilisé lors d'une détermination d'AO à l'aide de l'atlas de GP dans la période péripubertaire [34].

IV.4. Des commentaires sur les méthodes d'estimation de l'âge osseux

Il serait bon de rappeler que presque toutes les études déjà citées, se basent sur des sujets généralement correctement nourris, exempts de toute pathologie aiguë ou chronique, ou de traitements qui pourraient altérer la formation de tissus osseux [67].

En cela, la validité d'une estimation d'âge peut être réduite si le sujet investigué présente une dénutrition ou bien une pathologie touchant l'os par exemple. Dans ce genre de situation, l'estimation de l'âge du sujet lui donnera un âge inférieur à l'AR [67].

Toute estimation de la maturation squelettique ne peut pas s'échapper des contraintes inhérentes aux méthodes adoptées. Le résultat final est un AO « relatif » ou « imprécis ».

Dans cet exposé, nous abordons des éléments spécifiques contrariant l'évaluation de l'AO et pouvant la biaiser.

1. Le premier commentaire : une maturation « influencée »

Les méthodes d'estimation de la maturation squelettique sont unanimement contestées au regard de leur manque de fiabilité. Depuis un certain nombre d'année déjà, il est d'ailleurs scientifiquement établi qu'aucune d'entre elles ne permettent de « déterminer » un AC [21]. Les différences individuelles, raciales, ethniques, nutritionnelles, socio-économiques, d'état de santé et autres [21, 52, 53, 131] ne permettent que d'obtenir une estimation de celui-ci, à 18 mois près dans le meilleur des cas [21, 142].

En effet, quelques méthodes de références, celle de Greulich et celle de Tanner par exemple, recèlent en elles-mêmes, un risque d'erreur majeur à l'égard d'enfants non caucasiens, originaires d'Afrique ou d'Asie, dont le développement osseux peut être tout à fait hétérogène par rapport aux références anglo-saxonnes de ces méthodes et qui peut être profondément affecté par des carences ou des pathologies inconnues dans les populations de référence remontant à plus d'un demi-siècle. Même au sein d'une population dite caucasienne, le développement osseux comporte une grande hétérogénéité [52].

Concernant les tables servant de référence pour déterminer l'âge, rappelant que la table Greulich est basée sur une étude faite à la Stanford University de Californie par référence à une population californienne, et celle de Tanner est réalisée à l'Université de Londres sur un échantillonnage britannique. La maturation osseuse, qui varie avec les races et les régions, est plus précoce chez les enfants de race africaine : un AO estimé à 18 ans chez un Guinéen en se basant sur une radiographie de la main et du poignet correspond très vraisemblablement à un AR nettement moindre [88], et un Africain du Centrafrique peut à 14 ans présenter un développement staturo-pondéral le faisant passer pour 19 ans [53, 54]. Ceci relève le manque de fiabilité desdites

tables pour déterminer l'âge d'un enfant ou adolescent : c'est difficile alors de transposer la maturation d'enfants caucasiens à des enfants de race noire [88], car quelle que soit la méthode d'examen adoptée, l'évaluation de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent butte sur la grande variabilité des indices relevés par rapport à l'ethnie de ces sujets [54].

En plus, et depuis 50 ans, les signes de maturation osseuse ont évolué en fonction de divers facteurs, en particulier nutritionnels. La discordance entre AR et âge biologique est alors accrue par l'existence de plus d'un demi-siècle de changements morphologiques qui ont évolué de façon hétérogène selon les pays [52].

Les principales méthodes radiologiques classiquement utilisées datent d'une époque où la démarche anthropologique et statistique était moins sophistiquée que de nos jours et surtout où les populations humaines étaient moins diversifiées dans nos cités. Plusieurs travaux de revalidation des méthodes de GP ou de TW sur des populations étrangères, asiatiques ou africaines ont abouti à des résultats discordants, quoique plutôt globalement rassurants dans l'ensemble [80].

Au total et en pratique, les différents critères radiologiques relevés sur un patient ne sont jamais comparés avec une population de référence appartenant à la même ethnie car ces atlas n'existent pas pour la population étrangère actuelle retrouvée sur les territoires des pays. Il en résulte que les critères radiologiques relevés sont « mauvais scientifiquement », les méthodes citées ci-dessus ne prennent pas en compte les réelles différences de croissance et de maturation osseuse liées à l'origine ethnique et aux carences nutritionnelles dont souffrent bien souvent des individus. L'estimation ne peut donc être transposée qu'avec un certain facteur d'imprécision [53, 54].

C'est pourquoi cette imprécision a conduit depuis longtemps à recourir à d'autres méthodes d'évaluation qui n'échappent pas aux écueils précédemment évoqués, comme : (1) la radiographie panoramique dentaire, et (2) l'examen clinique des signes de puberté. En fait, non seulement le développement dentaire et la manifestation des signes de puberté sont très hétérogènes selon les personnes, mais des modifications majeures concernant l'âge de leur survenue, liées à divers facteurs environnementaux, rendent de plus en plus aléatoire l'interprétation individuelle et la fixation d'un AC réel [52]. De plus, les phénomènes pubertaires interfèrent eux-mêmes avec la maturation osseuse, et à l'adolescence, en particulier dans les deux ans précédant le pic de croissance staturale, l'AO progresse plus rapidement que l'AC [86].

2. Le deuxième commentaire : des critères face à une « frontière »

De façon générale, les examens cliniques et/ou radiologiques effectués dans un but diagnostique et/ou thérapeutique pour une maladie, ne posent éthiquement le problème ni de leur indication, ni, pour les seconds, de la dose de rayonnement reçu, quand ils sont effectués selon les bonnes pratiques [52].

Les différentes méthodes utilisées pour estimer la maturation squelettique ont été établies dans un but de diagnostic médical pour déceler différentes pathologies tels les retards de croissance, et non spécifiquement pour déterminer l'âge d'un individu [54]. La précision d'une de ces méthodes peut être nécessaire en application clinique (orthopédie, endocrinologie…), mais il s'agit souvent de suivi plus que d'une valeur à un temps donné [36].

Par contre, en application médico-légale, il est nécessaire de bien connaître la précision et les limites des méthodes d'estimation d'AO utilisées [36]. En effet, le praticien ou la radiologue est confronté de plus en plus à une demande d'estimation de l'âge chez des mineurs sur réquisition et doit pouvoir donner une estimation et si possible l'écart-type ou l'IC. Cette détermination peut être lourde de conséquences car le droit définit les statuts de mineurs (moins de 10, 13, 16, 18 ans) pour en tirer des conséquences juridiques adaptées à l'âge[1]. Or, les méthodes d'estimation d'AO ont été créées dans un but médical et statistique et nullement dans un but juridique et individuel [36].

3. Le troisième commentaire : une applicabilité à « retester »

S'il est bien démontré actuellement que la maturation osseuse d'un enfant ou d'un adolescent s'effectue plus rapidement que par le passé, aucune des abaques de croissance n'a été remise aux normes actuelles [53, 54, 86]. En effet, les tables de référence utilisées, de Tanner ou de Greulich voire encore de Sempé, datent de nombreuses années et n'ont pas été actualisées et remises à jour en fonction de la maturation de nos enfants et adolescents actuels [86, 88], des critères personnels de type nutritionnel ou ethnique seront autant d'interférence dans le résultat obtenu pour une méthode donnée [86].

Pendant longtemps, les populations dans le monde ont été relativement homogènes et tous les critères maturatifs étaient relativement concordants. Il n'en est plus de même actuellement en raison de l'influence de nombreux facteurs, tels l'immigration, les différences considérables du statut nutritionnel, les conditions socio-économiques des divers groupes humains, etc. [53].

Une question se pose donc : les méthodes de détermination de l'AO sont-elles adaptées aux populations contemporaines ? [53], tout en sachant qu'il est particulièrement inquiétant, à une époque où se développe une médecine « fondée sur les preuves », de voir pratiquer des examens dont la signification et la validité, par rapport à l'objet même de la demande d'expertise, n'ont pas été évalués depuis plus de 50 ans ! [52], les tables de maturation osseuse actuellement disponibles sont déjà anciennes, « périmées », même pour les individus qui avaient alors servi de référence il y a plus de 50 ans [54]. La détermination de l'AO doit être extrêmement prudente car la radiographie du patient n'est jamais comparée à sa population de référence [86].

[1] Par exemple, un étranger mineur âgé de moins de 18 ans ne peut pas être expulsé et peut, sous certaines conditions, bénéficier d'une régularisation de son séjour sur le territoire français [36].

Au total, la meilleure réponse éthique à l'imprécision des techniques actuelles sera de susciter de nouvelles recherches scientifiques. Cela permettra d'atteindre deux objectifs : (1) préciser la valeur réelle sur les populations actuelles diversifiées, des critères classiques autrefois établis sur un nombre restreint de sujets d'origines ethniques souvent homogènes et très largement différentes de celles des individus sur lesquels ces méthodes sont actuellement appliquées ; (2) à plus long terme, pour tenter de développer des méthodes plus précises, plus exactes et fiables et si possible non exposantes, rapides, économiques et faciles à mettre en œuvre en tous lieux [81].

4. Le quatrième commentaire : des âges « critiques »

La méthode d'estimation de la maturation osseuse basée sur la radiographie de la main et du poignet perd beaucoup de sa sensibilité quand les individus sont examinés à un âge où les changements dans la morphologie des noyaux d'ossification ne sont plus aussi criants, et cela autour de la puberté [88].

Bien que l'estimation soit plus aisée en-dessous de 12-13 ans, compte tenu de la multiplicité des sites osseux immatures qui peuvent être appréciés sur le plan du nombre et de la qualité, le problème est complexe surtout pour les enfants en fin d'adolescence [88].

5. Le cinquième commentaire : des conditions d'examen « agressives »

La soumission des mineurs étrangers à des investigations radiologiques et à un regard médical peut apparaître comme porteuse d'une certaine « violence » [52].

Ces expertises radiologiques (bien que peu irradiantes [36]) ainsi que l'examen clinique, destinés aux enfants et adolescents étrangers, sont effectués dans une structure hospitalière apparentée à une structure policière [52], généralement sans consentement de la personne elle-même ou d'une personne de référence [36, 52], et peuvent blesser leur dignité sans comprendre leur finalité [52].

Au-delà des problèmes éthiques soulevés par la validité scientifique des méthodes d'évaluation d'âge, une des questions majeures est celle en effet des conditions dans lesquelles sont réalisés les examens [52].

Il importe de veiller à ce que ces conditions soient les moins traumatisantes possibles pour des enfants, éprouvés déjà pour certains, par des événements personnels ou familiaux pénibles, et qui, sans information adaptée à leur état, peuvent être inutilement choqués. On ne se trouve pas toujours dans une situation d'urgence, et il est essentiel de tout faire pour tenter d'expliquer les raisons qui conduisent à demander de tels examens et en évitant qu'ils soient répétés [52].

6. Le dernier commentaire : un asynchronisme coté « numériquement »

L'hétérogénéité humaine est telle, dans le temps et l'espace, qu'il est vain de penser que d'ici longtemps il sera possible de déterminer, sans connaissance de sa date de naissance, l'AC exact, à un moment donné, d'une personne [52].

En effet, la détermination de l'âge d'un enfant ou d'un adolescent reste, en l'état des connaissances et des techniques actuelles, une procédure qui comporte une part

d'imprécision. Les enfants et les adolescent(e)s peuvent être déclarés plus âgés qu'ils ne sont en réalité ou au contraire plus jeunes, par l'expertise osseuse et l'examen clinique [52].

Qu'elles soient prises isolément ou combinées, ces méthodes n'apportent pas aujourd'hui les informations scientifiques précises demandées [52].

Il serait donc essentiel qu'une recherche soit entreprise pour tenter de savoir si l'élaboration de critères basés sur des indices biologiques permettant une appréciation la plus fine possible, est de l'ordre du possible [52].

Pour qu'une recherche pareille soit rentable, il faut faire une grande confiance à l'évolution des images radiologiques et de traduire leur progression vers la maturité complète en valeurs numériques de maturation osseuse et non par un système de comparaison à des « standards » inappropriés à la population d'un pays [134]. En fait, c'est très peu probable que la radiographie du poignet et de la main du sujet montre une correspondance parfaite des centres de maturation avec ceux visibles sur les clichés de référence des Atlas (de GP, par exemple) [67].

Cette approche « numérique » est basée sur la notion de l'absence du synchronisme ou « asynchronisme »[1].

L'asynchronisme de maturation des centres d'ossification ne permet pas toujours de superposer la radiographie à étudier avec celles de l'atlas. C'est pourquoi certains auteurs, dont Acheson, Tanner et al., et Sempé ont proposé une « méthode de cotation chiffrée » ou « méthode numérique » dans laquelle chaque centre d'ossification est analysé séparément et affecté d'un coefficient. Cette méthode est plus précise et plus fiable que celle de GP et est actuellement utilisée dans de nombreux pays européens [32].

Plusieurs auteurs notent que la maturation osseuse n'est pas au même stade au même moment pour tous les os du corps et de la main et que, de plus, cette maturation est artificiellement jugée en stades alors qu'il s'agit d'un continuum de maturation avec un certain os présentant à un moment donné une relative avance sur les autres qui ensuite le rattraperont, d'où la difficulté à décider quel os montre le mieux l'AC du sujet [67].

[1] L'asynchronisme désigne le caractère de ce qui ne se passe pas à la même vitesse, que ce soit dans le temps ou dans la vitesse proprement dite [150].

IV.5. CONCLUSION : Quelle (s) méthode (s) utiliser pour l'estimation de la maturation squelettique ?

Quelles que soient les limites déjà évoquées de l'utilisation de l'âge osseux, l'évaluation de la maturation squelettique reste l'examen de référence pour caractériser la croissance des enfants et des adolescents [32]. Et quel que soit la méthode d'évaluation de cette maturation, les critères globaux retenus de l'estimation standard demeurent les mêmes et reposent sur l'apparition des noyaux d'ossification, les modifications des noyaux d'ossification et la soudure des cartilages de conjugaison [32]. Bien qu'il soit désormais acquis qu'aucune méthode d'expertise scientifique ne peut «déterminer» avec précision et fiabilité l'âge d'un individu [86].
Les informations que fournit l'estimation de la maturation osseuse sont multiples et dépassent le simple « chiffrage » de cet AO [89]. Elle permet de retenir des éléments d'analyse importants à considérer [4, 89] (abrégés en « 4M ») : (1) observer l'avancée de la Maturation (aspect des métaphyses), (2) suivre l'évolution de la Morphologie, (3) apprécier le taux de la Minéralisation (épaisseur des corticales et structure osseuse), et (4) rechercher une Maladie (maladie osseuse constitutionnelle, dyschondrostéose, pseudohypoparathyroïdie, syndrome de Turner).

1. Quelle (s) est (sont) la (les) méthode (s) d'estimation d'âge osseux la (les) plus pertinente (s) pour une fin médico-légale ?

L'âge d'un enfant ou d'un adolescent ne se réduit jamais à une image, une mensuration ou une manifestation d'un développement pubertaire. En revanche, il est vraisemblable que l'on peut cerner plus facilement un statut de mineur en croisant des données psychologiques, sociales, culturelles, à côté d'une expertise collective et pluridisciplinaire. Le corps médical ne doit donc pas s'exclure de ses responsabilités, mais intervenir avec le plus de discernement possible en prenant en compte la complexité même de la situation. C'est précisément cette complexité qui rend de plus en plus difficile, en l'absence de données identifiantes, la fixation purement juridique d'un âge. La difficulté repose sur le fait que la loi doit respecter les droits fondamentaux et que la valeur d'âge est un critère bien fragile pour pratiquer ces droits [52].

a. Un débat sans cesse :

Les méthodes de détermination de l'âge sont-elles adaptées aux populations dont la justice a à connaître et peut-on éventuellement les améliorer ? C'est une question qui reste jusqu'à nos jours à l'ordre du jour [54]. Certes, la méthode la plus courante et la plus facile à réaliser repose sur la radiographie de la main et du poignet gauches, sachant que cette technique est destinée non pas à déterminer avec précision un âge mais à déceler certaines pathologies [142]. En effet, il convient de relever que les Atlas en référence visaient en premier lieu à diagnostiquer une maturation précoce ou tardive chez l'enfant dont on connaît l'AC, mais non pas à attribuer un AC en fonction de l'AO [86].

Le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) français, par exemple, confirme l'inadaptation des techniques médicales utilisées actuellement aux fins de fixation d'un AC. Il ne récuse pas à priori leur emploi, mais suggère que celui-ci soit relativisé de façon telle que le statut de mineur ne puisse en dépendre exclusivement [52].

Ce n'est pas tant le danger des examens que leur mise en œuvre dans un climat vécu comme « arbitraire » et « injuste », au détriment d'une prise en charge psychosociale toujours nécessaire dans un tel contexte. L'important est de protéger les enfants, non de les discriminer, ce qui renforce le rôle d'écoute du corps médical, même requis aux fins d'expertise [52].

Bien que la détermination de l'âge d'un individu pose un véritable problème aux médecins, ces derniers doivent remplir leur mission en utilisant des aspects spécifiques du développement humain (interrogatoire, examen, dentition, radiographie…). En effet, les critères d'évaluation de l'âge seront recherchés par l'examen clinique et des examens complémentaires qui ne doivent pas porter atteinte à l'intégrité corporelle de l'individu [54].

Il y a quatre « âges charnières » qui intéressent le juge et qui sont au nombre de (10 ans, 13 ans, 16 ans et 18 ans), et la juridiction compétente va dépendre de la tranche d'âge de l'individu [34], d'où le processus des réquisitions judiciaires pour déterminer l'AO à des fins médico-légales [3].

Devant une réquisition pareille, il est de devoir de rendre un résultat, un AO, mentionnant la « variabilité individuelle » [3] qui entraîne toujours une imprécision incompressible quelle que soit la méthode utilisée [34] : cette variabilité, qui n'est jamais inférieure à plus ou moins un an [3], est exprimée par la « fourchette d'estimation » [34, 52, 54, 81, 86, 142]. En fait, c'est l'examen radiographique qui permet de relever les différents paramètres permettant de proposer une fourchette d'estimation [54].

Il est indispensable qu'un AO dans un cadre médico-légal, pour être considéré comme valable, doit être exprimé en tenant compte d'une marge d'erreur et devra donc être donné avec des intervalles de confiance ou compris dans une «fourchette» [34, 86]. La validité d'un examen dépendra également d'autres critères tenant notamment au professionnalisme et à l'expérience du spécialiste qui analysera les données récoltées. On ne peut que souhaiter qu'il soit fait appel le plus souvent possible à des experts pédiatres, voire même à des psycho-pédiatres [86].

Contrairement à l'attente de certains magistrats ou officiers de police judiciaire, l'AC ainsi déterminé ne pourra être donné que sous la forme d'une « fourchette d'estimation » et non sous celle d'un âge précis [86]. Ce résultat fournie par la médecine peut être considérée comme acceptable sur le plan éthique ; mais en s'assurant aussi que le juge ne prenne pas systématiquement la valeur médiane, ce qui aboutirait à donner un résultat faussement précis ; dans le doute, le juge

ne devrait s'en remettre qu'aux éléments les plus favorables à l'enfant ou à l'adolescent [52]. L'AO devrait donc, en définitive, rester une indication complémentaire et non une détermination précise de l'âge d'un sujet, surtout quand une décision juridique en découle [86].

b. <u>Les tendances scientifiques d'estimation de l'âge à des fins médico-légales :</u>

Les instances juridiques qui utilisent l'AO comme seul examen pour évaluer l'âge d'un sujet vivant se voient, à cause de la marge d'erreur, ou DS, unanimement reconnue de 2½ à 3 ans, au mieux réviser leur jugement ou au pire incarcérer des mineurs à tort. En conséquence, l'idéal est bien de faire appel à plusieurs méthodes d'évaluation de l'âge et le minimum est de vérifier la concordance entre l'AO et l'âge dentaire comme ce qui est généralement demandé par les juges genevois, mais cela semble toutefois peu satisfaisant, surtout si les seuls outils sont la radiographie de poignet et l'OPT (ou panoramique dentaire) [67].

Par conséquent, plusieurs groupes de travail ont penchés sur ce sujet afin de trouver une manière d'évaluer de façon fiable un âge d'un individu pour des fins médico-légales.

Pour cela, on cite essentiellement **4 tendances** :

- **(1)** Le « Study Group for Forensic Age Estimation » (Groupe d'étude pour l'estimation médico-légale de l'âge) a proposé des critères d'évaluation de l'âge chez le sujet vivant sous forme de recommandations basées initialement sur une évaluation des pratiques des médecins légistes de ce groupe comportant à ce stade 50 membres provenant d'Allemagne, d'Autriche, de Norvège et de Suisse [67].

  En résumé, les procédures utilisées pour l'expertise sont (Tab. 34) [67] :

  - L'examen clinique physique avec : mesures anthropométriques, évaluation de la maturation squelettique, et prise en compte de toute maladie affectant la croissance ;
  - Une radiographie de la main gauche ;
  - Un examen dentaire clinique et radiologique ;
  - Un examen supplémentaire radiologique ou TDM des clavicules pour déterminer si le sujet est âgé de plus de 21 ans.

  Il est intéressant de noter que 2 ans plus tard, le « Study Group » s'est élargi à 66 membres et 2 nations nouvelles (Belgique et Espagne) [67].

  Ce qui est important à souligner, deux choses [67] :

  a. L'expert qui va trancher dans la situation doit collecter les résultats obtenus par les collègues impliquées dans l'évaluation (le médecin légiste, le médecin généraliste, l'interniste ou le pédiatre pour l'examen physique ; l'odontologiste légiste pour l'examen clinique et radiologique dentaire ; le radiologue pour l'âge osseux) qui auront dû préalablement expliciter les différentes techniques qu'ils utilisent pour chaque modalité.

Tableau 34 : Evaluation des pratiques des membres du « Study Group for Forensic Age Estimation » [67]

Methods used for age estimations in criminal proceedings in the German-speaking countries*

Type of examination	Number of experts
Physical	
Body measures	15
Signs of sexual maturation	16
Radiographic (without dentition)	
Hand	22
Shoulder/upper arm	5
Collar bone	3
Pelvis	2
Femur	1
Knee	1
Foot	1
Shoulder blade	1
Breast bone	1
Paranasal sinuses	1
Dental	
Dental status	19
Orthopantogram/dental film	17
Plaster cast	5
Other	
Cross-section of hair	1

*by a total of 24 experts; multiple answers possible

b. L'importance de la réalisation de l'examen physique préalablement aux autres modalités pour permettre :
   - De déceler les facteurs qui peuvent retarder la croissance : une maladie, une dénutrition (à l'aide de l'index de masse corporelle), l'exercice d'un sport de compétition dans le jeune âge, un niveau de vie peu élevé, ainsi que l'origine ethnique ;
   - De relever une avance de la croissance, d'habitude rare, généralement due à un trouble endocrinien : gigantisme, acromégalie, puberté précoce, syndrome androgénital (hyperplasie congénitale des surrénales), hyperthyroïdie ;
   - D'affirmer une maturité sexuelle complète vers 16 ans chez la fille et 17 ans chez le garçon, cette mesure est peu fiable puisqu'il existe des variations selon l'origine ethnique.

Pour terminer, il faut retenir que [67] :

- La maturité squelettique complète, qui apparait sur les radiographies de la main, a lieu vers 17 ans pour la fille et 18 ans pour le garçon quelle que soit l'origine ethnique ;

- La fusion complète, sur examen TDM, de l'extrémité sternale de la clavicule avec visibilité de la ligne de fusion signe un AO de 20 ans pour la fille et 21 ans pour le garçon et la disparition de la ligne de fusion a lieu dès 26 ans pour les 2 sexes ;
- La maturation complète des dents de sagesse est atteinte vers 20-21 ans avec une maturation légèrement plus précoce chez le sujet noir africain et légèrement retardée chez le sujet asiatique, l'européen se situant entre les deux.

Tableau 35 : Les éléments de la procédure globale d'évaluation selon le « Study Group for Forensic Age Estimation » [67]

Examen physique	- Stature*, poids, morphotype - Maturité sexuelle **F** : pilosité axillaire (A1-A3), pubienne (P1-P5) Développement de la glande mammaire (B1-B5) d'après Tanner (selon [74]) + forme des hanches + horizontalisation de la vulve, développement des grandes lèvres, petites lèvres et clitoris + première règle (jamais avant l'accélération du pic de croissance* = 10 ans pour [112]) à la puberté [70] (13a2m d'après Béry cité par Charlet [44] pour ce dernier, dosage des 17-cétostéroïde dans l'urine). **M** : pilosité axillaire, pubienne et faciale, proéminence laryngée et mue vocale(début pendant le pic de croissance donc vers 11 ans pour [112]), croissance génitale (G1-G5), volume testiculaire (orchidomètre de Prader)[74] et plissement-pigmentation du scrotum [70], longueur du pénis flacide [74], premières éjaculations [70] et dosage des 17-cétostéroïde dans l'urine [44]
Radiographie de la main gauche	- maturation osseuse d'abord évaluée sur la forme et la taille des os et sur le degré d'ossification épiphysaire puis âge osseux selon la méthode de l'atlas de GP 1959 ou de sa mise à jour allemande Thiemam & Mitze 1991 ou encore par la méthode des scores TW (1975, 2001)
TDM extrémité sternale claviculaire	- en cas de fusion complète âge égal ou supérieur à 22 ans (Kreibner 1997, 1998)
Examen clinique bucco-dentaire	-éruption terminée de toutes les dents permanentes sauf dents de sagesse vers 12 ans et éruption des 3ème molaires en 5 ans pour les caucasoïdes vers 17 ans et en 2-4 ans supplémentaire le plan d'occlusion est atteint
Examen radiologique dentaire OPT	- minéralisation selon Demirjian avec minéralisation complète des 2ème molaires vers 16 ans et des 3ème molaires vers 21-23 ans + encore 3 ans pour les dents incluses

- **(2)** Garamendi et coll. ont vérifié le degré de confiance que l'on peut attendre de la classification en mineur/majeur avec limite de 18 ans au moyen de l'évaluation de l'AO par la méthode de l'atlas GP et de l'âge dentaire par les stades de maturation de Demirjian appliqués aux dents de sagesse. Cette étude était rétrospective, publiée en 2004 et portant sur 80 immigrés illégaux marocains dont l'âge a pu être transmis par l'ambassade

du Maroc après une évaluation initiale (compris les autres critères d'évaluation préconisés par le « Study Group ») [67].

Les auteurs trouvent que l'association des méthodes GP et Demirjian pour les dents de sagesse réduit de façon rigoureuse le risque d'erreur éthique de classification (évaluer l'âge d'un sujet comme étant majeur alors que ce dernier a réellement moins de 18 ans) au détriment d'une augmentation du nombre d'erreurs technique de classification (estimer qu'un sujet est mineur alors qu'en réalité il a plus de 18 ans), situation qui est humainement plus acceptable [67].

- **(3)** Très proche de la tendance précédente, Ferembach et coll., et suite aux travaux du « Groupe de travail d'anthropologues européens », ont proposé des recommandations pour la détermination de l'âge d'enfants et d'adolescents [63].
    a. La détermination de l'âge d'enfants jusqu'à 14 ans [63] :
    Elle se base sur le critère le plus important qui est le degré d'évolution des dents, c.-à-d. le degré de minéralisation et l'éruption des dents. Et à ce propos, le degré de minéralisation des différentes dents permet de déterminer l'âge avec plus de sûreté que leur éruption qui varie cependant très fortement. Pour la détermination du degré d'évolution des dents, les auteurs recommandent l'utilisation du « schéma d'Ubelaker (1978) ». La détermination de l'âge d'après les dents se fait de façon plus sûre et plus différenciée pour les jeunes enfants que pour les enfants plus âgés. Pour un diagnostic plus sûr de l'âge, il est recommandé, pour les enfants à partir de 12 ans, de faire entrer en ligne de compte des critères d'ossification.
    b. La détermination de l'âge chez les adolescents [63] :
    Après la 14ème année, le développement des dents donne encore quelques indices pour déterminer l'âge de non-adultes, à défaut, le degré d'évolution de la troisième molaire qui peut donner un renseignement grossier. Mais le critère le plus important est la synostose (fusion) épiphyse-diaphyse des os longs. De même l'ossification du pelvis, de la scapula, du sternum, du sacrum et des phalanges peut donner des indications. Les atlas de Pyle et Hoerr (1955) pour l'ossification des os de la main et celui de Greulich et Pyle (1959) donnent des radiographies des différentes phases de l'ossification, mais ils sont moins utilisables pour la détermination de l'âge sur le squelette, et peuvent être remplacés par Flecker (1942), Haret (1927) ou Sempé (1971). Si la troisième molaire est entièrement formée et si elle a atteint la surface de mastication des autres molaires, ce sera un signe « d'adulte » (Demisch et Wartmann, 1956).

- **(4)** Nuzzolese et Di Vella exposent les moyens utilisés en Italie pour déterminer l'état de mineur ou de majeur des immigrants illégaux [67] :
    a. Un examen physique, où sont notés le poids, la taille, les caractères sexuels secondaires, l'état général et l'état de la peau ;
    b. Un examen clinique bucco-dentaire, évaluant l'état de la muqueuse et des dents ainsi que le type de denture ;
    c. Une radiographie de la main non dominante, pour estimer un AO selon Greulich-Pyle + Fels ;
    d. Une radiographie de bassin, si les examens cliniques laissent supposer que le sujet est majeur, pour estimer l'AO selon le test de Risser ;
    e. Un OPT, pour estimer un âge dentaire selon l'éruption, selon l'état de maturation radiculaire de la dent de sagesse [d'après Harris et Nortjè (établi pour les noirs sudafricains) + Kullman (établi sur des suédois)] et selon Moorrees.

  Les auteurs rapportent que trois experts s'occupent de l'évaluation :
    - Un médecin légiste, pour examen physique et synthèse du cas,
    - Un radiologue, pour AO sur les radiographies du poignet et du bassin,
    - Un dentiste spécialiste de l'odontologie légale, pour âge dentaire d'après l'examen clinique et l'analyse de l'OPT.

  Ils soulèvent néanmoins le fait que malgré tous les moyens et experts mis à disposition, il est difficile d'obtenir une précision de l'âge avec une marge d'erreur inférieure à 3 ans et que, en cas de doute, celui-ci doit, pour des raisons éthiques, profiter à l'accusé [67].
- **(5)** Par ailleurs, d'autres auteurs défendent l'utilisation de quelques autres indices ou méthodes dans la détermination de l'âge (osseux) pour un intérêt médico-légal, citons par exemple :
    a. L'intérêt médico-légal de l'os sésamoïde du pouce, qui peut avoir un rôle pour les âges charnières de 10 et de 13 ans à condition de ne pas être pris en compte de façon isolée mais en association avec l'analyse complète de l'ensemble des os de la région main-poignet, voire en combinant d'autres méthodes (analyse du coude par Sauvegrain et Nahum) afin d'obtenir un résultat le plus juste possible [34].
    b. Aussi, et pour la pratique médico-légale, elles sont fréquemment utilisées : la méthode de Greulich-Pyle et/ou l'étude de l'ossification de l'extrémité médiale de la clavicule, éventuellement complétée par l'étude du coude [62].

       La méthode d'estimation de l'AO selon Greulich et Pyle ne permet pas, lorsqu'elle est utilisée comme unique méthode, de déterminer de façon adéquate si un requérant d'asile est mineur ou adulte [48], cette méthode doit être complétée puisque l'AO déterminé par des méthodes pareille n'est pas assez puissant au sens statistique du

terme, c.à.d. leur écart-type est trop important et elles ne distinguent pas entre l'ethnie des populations [53, 54].

c. L'imprécision avérée des méthodes radiologiques nécessite, en raison des importantes conséquences légales ou réglementaires, de concorder les résultats de plusieurs techniques d'évaluation (coude et poignet-main par exemple), surtout lorsque l'individu a un âge proche d'un palier chronologique important dans son cas juridique [81].

c. <u>Des recommandations pratiques :</u>

Les expertises d'AO appellent la plus grande prudence, de l'aveu même des médecins qui les pratiquent [142]. Techniquement, cette estimation d'âge doit se référer aux recommandations suivantes :

- Il convient de pratiquer toute l'opération par des spécialistes confirmés [142], d'utiliser les méthodes adaptées à l'âge apparent de l'intéressé, quitte à les compléter secondairement en fonction des premiers résultats, les interpréter prudemment, et savoir exprimer les réserves classiques, éventuellement renforcées en cas de carence nutritionnelle, de suspicion médicale d'un retard de croissance ou d'une maturation précoce [81].
- La double lecture des âges osseux, dont une au moins obligatoirement par un radiologue ou endocrino-pédiatre [39].
- Le panoramique dentaire ne constitue qu'un argument complémentaire en cas de discordances importantes [39].
- L'examen clinique du développement pubertaire en milieu spécialisé, qui ne se limite pas uniquement à la mesure du volume testiculaire chez le garçon et à l'échographie pelvienne chez la fille, doit s'entourer des précautions qui se réfèrent aux règles de pratique médicale et du respect de l'individu [39].
- La présentation des résultats de l'estimation d'âge doit être faite sous forme de fourchette et non en indiquant un âge précis, qui ne peut pratiquement être déterminé [81, 142]. En effet, il paraît important de relayer largement cette dernière information concernant le résultat qui doit mentionner la variabilité individuelle auprès des institutions judiciaires [3], et que la justice doit être à même de prendre en compte la discordance fréquente entre l'âge biologique et l'âge juridique [52].
- L'état de santé de la personne peut mener à une variation de l'AO par rapport à la norme. Une appréciation de l'AO sans investigation additionnelle de l'état de santé du requérant d'asile, notamment en ce qui concerne de possibles anomalies hormonales, est donc à proscrire [48].

2. Quelle (s) est (sont) la (les) méthode (s) d'estimation de la maturation squelettique la (les) plus pertinente (s) pour une fin médicale ?

Comme il peut s'intégrer dans une démarche médicolégale, l'estimation de l'« âge osseux » peut s'intégrer aussi dans une démarche médicale, il s'agit d'apprécier la maturation osseuse de l'enfant et d'adolescent et d'en assurer le suivi [34].

L'évaluation précise de la maturation revêt une importance médicale [36], surtout en pédiatrie en s'intéressant au développement normal ou pathologique de l'enfant et de l'adolescent ou aux troubles de la puberté, mais aussi en orthopédie pédiatrique, en orthodontie, en psychologie, en médecine du sport, etc. [23, 24, 36].
L'utilisation des méthodes d'estimation de l'AO assistée par ordinateur, comme celles de Tanner et Whitehouse (CASAS) ou de Sempé (Maturos), a permis d'améliorer sa précision et de diminuer le risque d'erreur lié à l'interprétation radiographique [32]. Le Maturos, par exemple, est un outil logiciel établi sur le fondement des travaux du Pr Michel Sempé, facilite à la fois la cotation radiologique de l'AO, et l'expression probabiliste de son résultat [81].

a. <u>Le concours des méthodes et des mesures :</u>

(1) La majorité des équipes utilisent des méthodes où l'estimation de l'AO se fait sur le poignet et la main, qui reste la référence. Toutefois, la détermination de l'AO basée sur le coude présente également un intérêt non négligeable. En effet, la différence inter-observateurs pour l'AO de la main déterminé avec l'Atlas de Sempé et Pavia a été évaluée à 6,1 mois (maximum : 25 mois). Cette différence inter-observateurs se réduit à 1,8 mois (maximum : 13 mois) si l'on utilise l'AO déterminé au coude [87].

Seulement, la méthode basée sur le coude n'est utilisable que dans la tranche d'âge de 9-13 ans chez la fille et 10-16 ans chez le garçon. Ainsi, lorsqu'une précision optimale est requise, il semble intéressant d'utiliser les deux méthodes, poignet-main et coude [87].

(2) Par ailleurs, l'Atlas de GP et celui de TW sont des index bien utiles. Pour l'interprétation de ces index, il faut en effet tenir compte de la variabilité normale, puisque l'influence de la race et de l'état nutritionnel est sous-estimée dans les Atlas sus-cités [88].

(3) En dehors de la mesure propre de l'AO, un excellent indicateur du déclenchement de la puberté est l'apparition de l'os sésamoïde du pouce, à 11 ans chez la fille et à 13 ans chez le garçon. Il semble que l'apparition de l'os hamatum coïncide bien aussi avec le déclenchement de la puberté [89].

(4) Seule une combinaison des méthodes passées en revues permet de tendre vers l'estimation d'un âge [86]. En fait, au cours de l'adolescence, Il est parfois difficile d'évaluer un test de Risser, qu'il faut alors s'aider du cartilage de conjugaison triradié (en Y) de l'os coxal, de celui de l'épiphyse proximale du fémur, et du coude. Alors, une simple radiographie du bassin complétée par celle du coude, permet d'identifier quatre phases pendant la puberté [4, 55, 124] :

a. La 1ière phase, de 11 à 12 ans d'AO chez la fille, 13 à 14 ans chez le garçon :
   - le Risser à 0,
   - les cartilages de croissance du coude sont ouverts,
   - le cartilage triradié est ouvert ;

b. La 2ème phase, de 12 à 13 ans d'AO chez la fille, de 14 à 15 ans d'AO chez le garçon :
   - le Risser est à 0,
   - les points d'ossification du coude sont en voie de fermeture,
   - le cartilage triradié fermé ;
c. La 3ème phase :
   - le test de Risser est à 1 ou 2,
   - les points d'ossification du coude sont fusionnés,
   - le cartilage de conjugaison du grand trochanter encore ouvert ;
d. La 4ème phase, permet de juger de l'arrêt de la croissance.
   - le Risser est 3, 4 ou 5,
   - les points d'ossification du coude sont fusionnés,
   - le cartilage de conjugaison du grand trochanter est fermé.

(5) Dans tous les cas, il est important de confronter les résultats obtenus à des paramètres cliniques simples tels que l'évolution de la taille assise, de la taille debout ainsi que quelques repères radiographiques fiables. Comme [87] :

- 10 ans : l'ossification du petit trochanter et de l'olécrane ;
- 11 ans : l'apparition de l'os sésamoïde du pouce chez la fille, et fermeture du cartilage triradié du bassin chez la fille ;
- 13 ans : l'apparition de l'os sésamoïde du pouce chez le garçon, et apparition du Risser chez la fille ;
- 15 ans : l'apparition du Risser chez le garçon.

(6) En période néonatale, l'appréciation de la maturation osseuse est donc au mieux mise en évidence par trois clichés : genou de face, pied de profil, épaule de face. Au total, on utilisera [124] :

a. De 0 à 3 mois, genoux de face, pieds de profil, épaules de face ;
b. De 3 mois à 2 ans, radiographies d'un hémi-squelette ;
c. De 3 mois à la fin de la croissance, radiographie de la main gauche et du poignet gauche ;
d. De 8 à 14 ans, on ajoutera le coude gauche de face et de profil ;
e. En fin de croissance, le test de Risser au niveau des crêtes iliaques.

b. <u>Des recommandations pratiques :</u>

- Devant les résultats parfois discordants et imprécis des méthodes conçues pour l'estimation de l'AO, des auteurs conseillent l'utilisation de la même méthode pour le suivi d'un enfant [36].
- La subjectivité de lecture peut se réduire en faisant appel à des lecteurs entraînés, et en pratiquant une double lecture indépendante [3].

c. <u>Tableau récapitulatif des méthodes et mesures utilisant la radiographie standard :</u>

En ci-après un tableau récapitulatif qui oriente le choix d'utilisation des méthodes par rapport aux âges chronologiques.

Tableau 36 : Les méthodes d'évaluation de l'âge osseux utilisées à des fins médicales

Age chronologique cible (période, année, mois)	Indicateurs / Mesures adaptées	Méthodes / Auteurs	Références
0 à **3 mois**	Genoux (de face), pieds (de profil), épaules (de face)		[124]
0 à 12 ans	Maturation poignet/main	Acheson	[121]
0 à **15 ans** (fille) **0** à **18 ans** (garçon)	Genou gauche (de face)	Atlas Pyle et Hoerr	[4]
de **la naissance** à **la fin de la croissance**	Maturation poignet/main	Atlas Sempé / Maturos	[24, 124]
3 mois à **2 ans**	Radiographie hémi-squelette	méthode de Lefebvre et Koifman	[124]
6 mois à **18 ans** (fille) **6 mois** à **19 ans** (garçon)	Maturation poignet/main	Atlas Greulich-Pyle	[67]
2 à **20 ans**	Etude du second métacarpien	Faruch Bilfeld	[62, 67]
8 à **16 ans** (fille) **8** à **18 ans** (garçon)	Maturation poignet/main	Scores TW	[67]
8 à **16 ans** (fille) **8** à **18 ans** (garçon)	Maturation poignet/main	Scores Fels	[67]
8 à **18 ans**	Maturation poignet/main	Björk	[67]
8 à **13 ans** (fille) **10** à **16 ans** (garçon)	Maturation du coude	Sauvegrain et Nahum Craviari et Sempé	[4, 36, 45, 53, 67, 86, 87, 121, 124, 132]
8,8 à **15,2 ans** (fille) **10** à **15,1 ans** (garçon)	Maturation de l'os sésamoïde du pouce		[34, 67, 87, 89]
à **10 ans**	Ossification du petit trochanter et de l'olécrane		[87]
10 à **12 ans** (fille) **12** à **14 ans** (garçon)	Maturation hamulus de l'os hamatum	Björk	[57, 67, 89]
à **11 ans** (fille)	Fermeture du cartilage triradié du bassin		[87]
11 à **26 ans**	Maturation de la clavicule	Schmeling	[67]
13 à **16 ans** (fille) **15** à **18 ans** (garçon)	Maturation de la crête iliaque	Risser	[53, 54, 67, 86, 87, 124]
14 à **20 ans**	Maturation des épiphyses distales poignet/cheville		[67]
Age max = **18 ans**	Maturation poignet/main	Schmidt	[67]

PARTIE

PRATIQUE

MATÉRIEL

&

MÉTHODES

I - MATÉRIEL et MÉTHODES

Notre étude est « auxo-radiologique », elle tente « de coupler la connaissance de l'âge chronologique avec l'étude de la taille et celle de la maturation osseuse grâce aux radiographies » [139].

Elle s'intéresse alors, à la maturation squelettique, pas seulement à son évolution, aux indicateurs osseux, à la quantification radiologique et à sa traduction en AO, mais aussi aux corrélations intimes de ce processus biologique avec la croissance staturopondérale, représentée ici par la taille, le poids et l'indice de corpulence.

Tous ceux-ci, au niveau d'une petite région anatomique, le poignet et la main gauches, qui résume l'état de la maturation squelettique de tout le corps humain d'un enfant ou d'un adolescent.

Une étude pareille, basée sur la méthode « auxo-radiographique », est hautement intéressante dans l'application clinique quotidienne.

Le langage « auxo-radiologique » est « une écriture dans l'espace et dans le temps, infra-verbale dans son expression, supra-verbale dans son interprétation » [137], et où l'enfant et l'adolescent parlent de leur maturation osseuse par l'intermédiaire la radiographie squelettique, et de leur croissance par l'intermédiaire des mesures anthropométriques.

Le premier objectif de cette étude, qui s'intéresse à la lecture des radiographies du poignet et de la main, demeure un préalable.

Le deuxième objectif, qui s'intéresse à l'étude des radiographies du poignet et de la main, va nous permettre de tracer le « schéma d'ossification » et de déduire les « standards » propres de notre échantillon qui pourraient être généralisés.

Le troisième objectif, qui s'associe aux radiographies du poignet et de la main, traite deux types de données : l'un complémentaire, l'indice de masse corporelle ; l'autre supplémentaire, le statut socio-économique.

Le couronnement de ce travail méthodique est la constitution d'une conclusion correcte, expérimentale et vérifiée à partir d'un ensemble cohérent de données auxo-radiographiques.

Notre travail évolue par étapes, il débute par ce chapitre premier « Matériel et Méthodes », qui exposera avec détails, les différents protocoles scientifiques suivis (recrutement, standardisation et application des protocoles de mesures, méthodes d'étude, etc…), il sera traité dans **deux grands volets** : le volet « Matériel » et le volet « Méthodes »…

I. 1. Le volet « Matériel »

Le volet « Matériel » présente une grande diversité dans son contenu, entre sujets, outils et procédés, et par conséquent un détail à cerner et à organiser.

Nous allons développer ce volet en suivant le plan décrit comme suit :

(1) La population d'étude
(2) Les clichés radiographiques
(3) Le logiciel Maturos® 4.0
(4) Les mesures anthropométriques
(5) Le statut socio-économique
(6) L'étude statistique
(7) Le rangement et l'identification des dossiers

(1) LA POPULATION D'ÉTUDE

La population ciblée dans cette étude est l'élément clé de toute la thèse.
En effet, chaque enfant et adolescent dont son nom figure dans la liste nominative (voir : tableau 38) est un « acteur principal » sur lequel est basée chaque conclusion extraite à la fin de cette étude.
Dans les lignes suivantes, nous allons procéder à donner toutes les informations générales sur la population d'étude : le parcours de sa détermination, ses critères, ses caractéristiques, etc…

A. La détermination de la population cible :

a. Le parcours

La détermination de l'échantillon a traversé un parcours double et bien étudié : l'un, celui de la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse » du CHU d'Annaba dont on a fait la moitié des clichés radiographiques ; et l'autre, celui à caractère personnel, dont la plupart de la deuxième moitié des clichés radiographiques ont été faites dans le secteur libéral, à la Clinique Al-FARABI à Annaba.



Figure 110 : L'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » et la Clinique « Al Farabi »

- Concernant le premier parcours :
  - Ce parcours a commencé après que j'ai eu l'avis favorable du Professeur BOUKADOUM N., le Médecin-Chef du service d'Imagerie Médicale au C.H.U. Ibn Rochd d'Annaba, le 27 octobre 2013, sur ma demande d'autorisation d'accès au service d'imagerie médicale de la clinique infantile « Sainte Thérèse » pour la prise de clichés radiographiques de la main et du poignet gauches dans le cadre de ma thèse.
  - Un plan de travail, proposé par moi-même, et accordé, après discussion et rectification, par l'ex-médecin-chef de la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse », le Défunt Docteur YAICHE Mohamed Cherif, et l'ex-médecin-chef du service de l'imagerie médicale de la clinique pédiatrique, le Docteur TOUATI, a été mis en action vers le mois de mai 2014 (Fig. 111, et voir aussi dans : ANNEXES).

PLAN DU TRAVAIL

(Dr. YAICHE, Dr. TOUATI)

- Une à deux journées au service de Radiologie pour prise de radiographies du poignet et main gauches
- Recrutement de l'échantillon (patients) :
  - Enfants et adolescents externes (consultants)
  - Enfants et adolescents internes (hospitalisés)

  } entre **6 mois** et **16 ans** et demeurant à **la wilaya d'Annaba**

- L'enfant ou l'adolescent ne doit pas être atteint d'une pathologie affectant la maturation osseuse (maladie cœliaque, endocrinopathies…)
- Consentement (écrit ou verbal) des parents ou accompagnants de la personne, en leur expliquant l'intérêt et la méthode
- Fiche de renseignement (ci-jointe), remplie pour chaque patient
- La prise du cliché radiographique doit respecter la fiche des critères de qualité (ci-joint)

Figure 111 : Le plan de travail « proposé » au sein de la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse »

- Sur le terrain, le recrutement des enfants et des adolescents s'est fait par le Docteur BOUHOUCHE, lors de la « consultation externe » parmi les patients qui viennent consulter à la clinique pédiatrique, quelquefois en urgence.



Figure 112 : La Salle de Consultation (Urgences Pédiatriques)

- Bien évidemment, ce recrutement a respecté les critères de choix mentionnés plus haut (intervalles d'âge, domicile et état de santé des sujets recrutés), après avoir obtenu le consentement verbal des

parents ou des accompagnants de l'enfant ou de l'adolescent, en leur expliquant l'intérêt et la méthode. A chaque recrutement, la « Fiche de renseignements » (Fig. 114) est remplie, la taille et le poids sont pris, de même qu'un seul cliché radiographique de la main et du poignet gauches.

- Dans la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse », la « Salle de Radiologie » se trouve au rez-de-chaussée, sur le même couloir en face de la « Salle de Consultation Externe » : le déroulement des opérations (accueil, informations, poids, taille et radiographie) était souple. La prise des clichés radiographiques du poignet et de la main gauches s'est déroulée à l'unité de Radiologie en respectant les consignes de la « Fiche des critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face » (voir titre : (2) Clichés radiographiques).



Figure 113 : La salle de Consultation en face de la Salle de Radiologie

- <u>Concernant le second parcours :</u>
  - C'est le parcours de nos connaissances, « acquitté » par nos propres dépenses, il concerne des familles évidemment volontaires, résidant dans la zone géographique d'Annaba, et dont les enfants ou adolescents répondent aux conditions citées plus bas.
  - Les enfants et les adolescents de nos connaissances personnelles (amis, voisins et collègues) forment la quasi-moitié de tout l'échantillon, ils sont recrutés après le consentement des parents. Juste après, nous avons entamé les mêmes étapes citées ci-dessus, avec quelques particularités pour les mesures anthropométriques et la prise des clichés radiographiques.

- Pour prendre les mesures du poids et de la taille de chaque enfant et adolescent de mes connaissances, j'ai fait appel à mes ressources personnelles pour l'acquisition d'un « pèse-personne électronique » et une « toise télescopique » (fixée sur le mur), et d'opérer ces mesures à mon domicile (voir titre : (5) Mesures anthropométriques).
- Et pour la prise des clichés radiographiques, j'ai sollicité le Directeur Général de la Clinique Al-FARABI pour autoriser mon accès au Service d'Imagerie Médicale à la Clinique AL-FARABI pour la prise de clichés radiographiques de la main et poignet gauches, dans le cadre de ma thèse. Il été favorable, vers le mois de novembre 2013, ce qui m'a permis de prendre contact avec le médecin chef du pôle d'imagerie, le Docteur AISSAOUI B., pour la mise en pratique de ma demande.

b. <u>Les caractéristiques de la population</u>

L'échantillon de l'étude ainsi regroupé comporte beaucoup de caractéristiques :

- c'est un échantillon d'enfants et d'adolescents ;
- habitent la wilaya d'Annaba ;
- ils proviennent de milieux socio-économiques aisés et moyens ;
- l'échantillon n'est pas grand, mais sa taille est statistiquement représentative ;
- l'échantillon est hétérogène, comprend : le garçon et la fille, de tout âge, de taille et de poids différents, distribués sur différentes commune de la wilaya d'Annaba…

c. <u>Les critères d'inclusion</u>

Cette étude s'intéresse à la maturation squelettique chez des enfants et des adolescents normaux.

Donc, sont concernés par cette étude, les sujets qui remplissent les critères suivants :

- (1) Les sujets doivent être des deux sexes, les garçons et les filles ;
- (2) Le sujet doit résider dans la wilaya d'Annaba ;
- (3) La fourchette d'âge d'inclusion est entre 3 mois et 17 ans non inclus ;
- (4) Le sujet doit avoir un état de santé général qui rassure le déroulement de la croissance staturopondérale et la maturation squelettique ;
- (5) Le sujet doit avoir la région du poignet et de la main gauche saine, non déformée et ne présentant pas une pathologie ostéo-articulaire affectant la maturation squelettique.

<u>Quelques remarques</u> sur le choix de ces critères :

- Concernant le premier critère : en matière de maturation et croissance, il y a toujours un décalage entre les deux sexes, en faveur des filles, qui

peut atteindre deux années. Les deux sexes doivent être présents dans l'échantillon ;

- Concernant le deuxième critère : c'était une consigne de l'expertise du « plan du sujet » de cette thèse, de se limité à la wilaya d'Annaba ;
- Concernant le troisième critère : la limite d'âge inférieure de 3 mois s'accorde avec le processus de la maturation squelettique au niveau de la main et du poignet qui débute au niveau du capitatum, vers 3 à 6 mois. Pour la limite d'âge supérieure de 17 ans non inclus, elle varie en fait, mais elle tourne autour d'un « âge charnière » par définition médico-légale qui est l'âge de 16 ans. Une deuxième raison, d'ordre opérationnel, c'est pour assurer le recrutement des adolescents de 16 ans, et quelques mois près, au sein de la clinique infantile puisque les âges au-delà de 16 ans n'atterrissent pas là-bas. Sans compter d'autres raisons : la puberté qui s'achève vers 16 ans en moyenne chez la fille ; la fin de la croissance qui survient lors de la disparition du cartilage de croissance et de la soudure épiphyso-métaphysaire, correspondant à un AO de 15 ans pour la fille et 16 ans pour le garçon, etc… ;
- Concernant le quatrième et le cinquième critère : l'état de santé général ou spécifique pour la région du poignet et de la main gauche est évalué par l'interrogatoire et l'examen clinique, et aussi rassuré par les parents des enfants et des adolescents.

d. <u>Les critères de non inclusion</u>

Ne sont pas concernés par cette étude, les sujets présentant les trois critères suivants :

- Toute personne âgée de 17 ans et plus ;
- Toute personne originaire d'une autre wilaya ;
- Toute personne présentant une déviation standard (DS) supérieure à deux (2), en valeur absolue. Cet écart-type (ET) est calculé par le logiciel Maturos et inscrit sur le compte-rendu de la lecture faite ce logiciel. Le choix de cette valeur est justifié, puisque « la croissance d'un enfant à un âge donné est dite "anormale" si elle se situe au-delà de +2 DS ou en deçà de -2 DS » [27]

De plus, l'enfant ou l'adolescent retenu dans l'échantillon ne doit pas :

- être atteint d'une pathologie qui peut retentir sur la maturation osseuse : maladie cœliaque, endocrinopathies, etc… ;
- être atteint d'une pathologie entrainant des troubles de la croissance, hormonale ou autre ;
- être atteint d'une pathologie traumatique de la région du poignet et de la main gauche : fractures récentes ou consolidées ;
- être atteint d'une malformation osseuse de la région du poignet et de la main gauche ;

- présenter d'antécédents de chirurgie orthopédique sur la région du poignet et de la main gauche.

Et pourquoi toutes ces exceptions ? Selon Sempé [132] : « Il ne s'agit pas tant d'affections aiguës ou même modérément subaiguës qui n'ont pas un effet perceptible sur la longue durée de la maturation squelettique, que de la plupart des maladies endocriniennes qui, même très correctement jugulées, laissent planer un doute sur l'observance et les répercussions à long terme ».

B. La fiche de renseignements

La « Fiche de renseignements » est un formulaire qui a été rédigé pour collecter le maximum d'informations indispensables pour cette étude (Fig. 114, et voir aussi dans : ANNEXES).

FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Réf. Cliché : n°…… / année ……..

Date de la prise du cliché radiographique : ……

Nom : ……

Prénom : ……

Sexe : ……

Date et lieu de naissance : ……

Age civil (années, mois, jours) **:** ……

Domicile actuel (commune, quartier) **:** ……

Scolarité : ……

Poids (en kg) **:** ……

Taille (en cm) **:** ……

Statut socio-économique :

- **Niveau d'étude des parents :** ……
- **Profession des parents :** ……
- **Nombre d'enfants :** ……
- **Equipements et accessoires de l'habitat :**
  (eau, électricité, gaz de ville, TV, téléphone, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur, voiture, PC, tablette, internet)
  ……
  ……
  ……

Figure 114 : « Fiche de renseignements », remplie par chaque sujet recruté dans cette étude

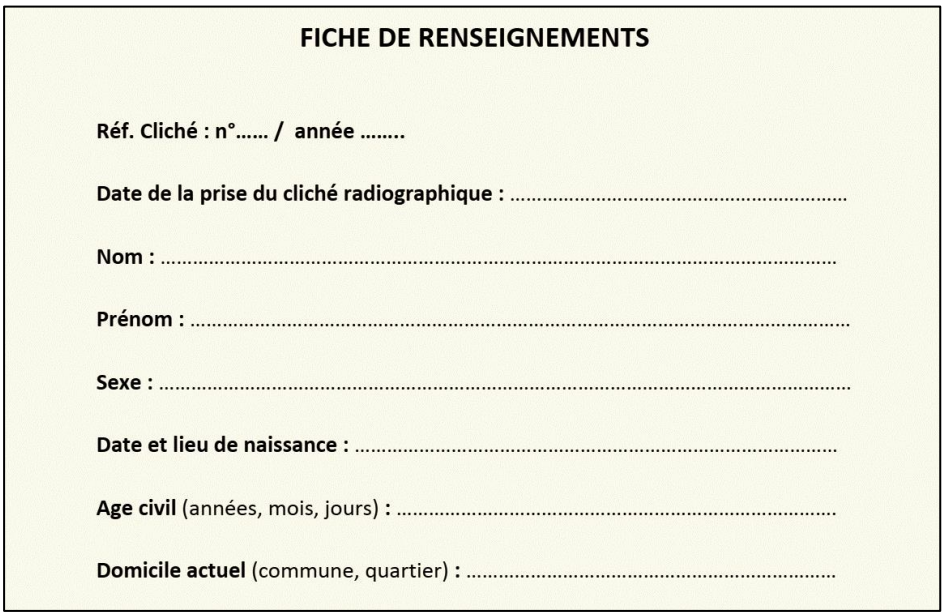
Cette « fiche » est le fruit de plusieurs lectures sur des études et des auteurs qui ont traité des thèmes en rapport avec la maturation squelettique [4bis, 23, 94, 137], en tirant profit de leur expériences et méthodes de travail.

Ce formulaire, par ses mots et ses lignes, est la « feuille de route » pour cette étude pratique.

De point de vue forme, le formulaire est divisé en deux parties : informations personnelles et questionnaire.

a. La première partie : Les informations personnelles

Par « informations personnelles » on sous-entend les informations d'« identité » de chaque enfant et adolescent, c'est-à-dire : le nom et le prénom, le sexe, l'âge (ici : la date de naissance) et le lieu d'habitation.



FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Réf. Cliché : n°…… / année ……..

Date de la prise du cliché radiographique : ……

Nom : ……

Prénom : ……

Sexe : ……

Date et lieu de naissance : ……

Age civil (années, mois, jours) **:** ……

Domicile actuel (commune, quartier) **:** ……

Figure 115 : La première partie de la « Fiche de renseignements »

Par ailleurs, cette première partie contient d'autres informations, qui s'inscrivent dans le vif de l'étude :

- « Réf. Cliché : n°…… / année …… » :
  C'est la référence du cliché radiographique de chaque enfant ou adolescent dans l'échantillon, il comporte un « Numéro de série » et l'« année de la prise de la radio ». C'est sur la base de cette référence que les dossiers des sujets de la population sont classés.
- « Date de la prise du cliché radiographique » :
  Cette date est indispensable, elle nous permet, avec la « Date de naissance », de calculer l'AC de la personne. Autrement dit, la radio fixe l'image du poignet et de la main à l'AC calculé.
- « Date et lieu de naissance » :
  Pour calculer, avec « Date de la prise du cliché radiographique », l'AC de l'enfant ou de l'adolescent.
- « Age civil (années, mois, jours) » :
  Dans la méthode de Sempé, l'AC ainsi que l'AO déjà exprimés par « année » et « mois », seront formulés uniquement par les « mois »,

selon lui, « tout âge doit être exprimé en mois : ceci facilitera beaucoup les comparaisons » [135].

Et comment convertir les « jours » de chaque âge civil quand on couple la « date de naissance » avec la « date de la radio » ?

Selon Sempé toujours : « chaque mois étant réputé avoir 31 jours, la date de changement de mois se calcule en ajoutant ou en retranchant 15 jours » [135], c'est-à-dire, si les jours sont inférieur à 15 on retranche 15 jours, et c'est un mois en moins ; et si les jours sont supérieur ou égal à 15 on ajoute 15 jours, et c'est un mois en plus [135].

Tableau 37 : Le « Calendrier postnatal doublé », c'était mon calendrier « personnel » de conversion entre Mois et Année

LE CALENDRIER POSTNATAL DOUBLÉ

MOIS						ANNEES
1	2	3	4	5	6	1ière
7	8	9	10	11	12	
13	14	15	16	17	18	2ème
19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	3ème
31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	4ème
43	44	45	46	47	48	
49	50	51	52	53	54	5ème
55	56	57	58	59	60	
61	62	63	64	65	66	6ème
67	68	69	70	71	72	
73	74	75	76	77	78	7ème
79	80	81	82	83	84	
85	86	87	88	89	90	8ème
91	92	93	94	95	96	
97	98	99	100	101	102	9ème
103	104	105	106	107	108	
109	110	111	112	113	114	10ème
115	116	117	118	119	120	
121	122	123	124	125	126	11ème
127	128	129	130	131	132	
133	134	135	136	137	138	12ème
139	140	141	142	143	144	
145	146	147	148	149	150	13ème
151	152	153	154	155	156	
157	158	159	160	161	162	14ème
163	164	165	166	167	168	
169	170	171	172	173	174	15ème
175	176	177	178	179	180	
181	182	183	184	185	186	16ème
187	188	189	190	191	192	
193	194	195	196	197	198	17ème
199	200	201	202	203	204	

Ce calcul est expliqué par la vision suivante : « avant quinze jours, l'infant n'a pas d' « âge » qui soit exprimable en mois : tout mois est réputé couvrir la période qui s'étend de moins à plus quinze jours » [135].

Dans le but de faciliter la tâche de « conversion » entre année et mois, utilisée ici dans le tableau 38 et sera utilisée aussi plus loin (volet « Méthodes » et chapitre « Résultats »), une « table de conversion » (Tableau 37, et voir aussi : « ANNEXES »), est tracée manuellement pour permettre la conversion rapide des années en mois et vice versa.

b. La deuxième partie : Le questionnaire

La deuxième partie du formulaire est un questionnaire, lui aussi formé de deux tranches de questions, celle des mesures anthropométrique, et celle du statut socio-économique (SSE).

Le détail de cette deuxième partie sera étalé plus loin (voir les titres : (4) mesures anthropométriques, (5) statut socio-économique)

Scolarité : .....

Poids (en kg) **:** .....

Taille (en cm) **:** .....

Statut socio-économique :

- **Niveau d'étude des parents :** .....
- **Profession des parents :** .....
- **Nombre d'enfants :** .....
- **Equipements et accessoires de l'habitat :**
  (eau, électricité, gaz de ville, TV, téléphone, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur, voiture, PC, tablette, internet)
  .....
  .....
  .....

Figure 116 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements »

C. La population : en chiffres et en pourcentages

Après tout ce parcours préparatoire, et avec toute l'aide inestimable des parents des enfants et des adolescents, des équipes médicale et paramédicale de la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse » et de la Clinique Al-Farabi, on a pu rassembler tout un échantillon, qui deviendra le point de départ de l'étude pratique.

En ci-après, la liste complète nominative de notre population (Tableau 38), où figurent les informations suivantes : le numéro du dossier, le nom et le prénom,

le sexe, la date de naissance, la date de la prise du cliché radiographique et le domicile.

Tableau 38 : La population recrutée (1)
Les informations générales (D'après : Fiche de renseignements)

N°	N° Dossier	Nom et Prénom	Sexe (M/F)	Date de naissance (jj/mm/aaaa)	Date de la prise de la radio (jj/mm/aaaa)	Age civil (AC) (années, mois)	Domicile (commune)
01	001/2012	B. Oussama	M	18/12/2008	23/12/2012	4 ans (48 mois)	/
02	002/2013	A. Rahaf	F	08/04/2005	26/11/2013	8 ans, 8 mois (104 mois)	Annaba
03	003/2013	A. Ranim	F	06/12/2005	28/11/2013	8 ans (96 mois)	Annaba
04	004/2013	A. Taha	M	21/08/2011	03/12/2013	2 ans, 3 mois (27 mois)	Annaba
05	005/2013	S. Mosaab	M	12/11/2006	05/12/2013	7 ans, 1 mois (85 mois)	Annaba
06	006/2013	S. Tesnim	F	31/01/2010	05/12/2013	3 ans, 10 mois (46 mois)	Annaba
07	007/2013	K. Malek	F	05/11/2009	10/12/2013	4 ans, 1 mois (49 mois)	El-Bouni
08	008/2013	K. Amani Naouara	F	05/11/2005	10/12/2013	8 ans, 1 mois (97 mois)	El-Bouni
09	009/2013	K. Ouassim	M	10/04/2010	12/12/2013	3 ans, 8 mois (44 mois)	Sidi Amar
10	010/2013	A. Rafif	F	09/11/2012	16/12/2013	1 an, 1 mois (13 mois)	Annaba
11	011/2013	R. Djoumana	F	30/09/2012	23/12/2013	1 an, 3 mois (15 mois)	Sidi Amar
12	012/2014	A. Amine Arrehmane	M	15/01/2009	13/01/2014	5 ans (60 mois)	Annaba
13	013/2014	B. Alae	F	10/01/2013	16/01/2014	1 an (12 mois)	Annaba
14	014/2014	B. Ibrahim Anes	M	21/04/2011	16/01/2014	2 ans, 9 mois (33 mois)	Annaba
15	015/2014	K. Abdelmoumen	M	21/09/2008	28/01/2014	5 ans, 4 mois (64 mois)	Annaba
16	016/2014	K. Imen	F	23/01/2005	28/01/2014	9 ans (108 mois)	Annaba
17	017/2014	K. Amina	F	27/06/2003	28/01/2014	10 ans, 7 mois (127 mois)	Annaba
18	018/2014	D. Halima	F	30/04/2010	29/01/2014	3 ans, 9 mois (45 mois)	El-Bouni
19	019/2014	D. Aroua	F	12/04/2013	29/01/2014	10 mois	El-Bouni
20	020/2014	D. Razane	F	24/06/2013	06/02/2014	7 mois	El-Bouni
21	021/2014	D. Mohamed Chahid	M	03/01/2012	06/02/2014	2 ans, 1 mois (25 mois)	El-Bouni
22	022/2014	D. Tasbih Alabrar	F	02/04/2008	06/02/2014	5 ans, 10 mois (70 mois)	El-Bouni
23	023/2014	D. Raed Salah	M	05/08/2011	06/02/2014	2 ans, 6 mois (30 mois)	El-Bouni
24	024/2014	L. Fatima	F	08/06/2011	11/02/2014	2 ans, 8 mois (32 mois)	Annaba
25	025/2014	L. Amine	M	21/02/2001	11/02/2014	13 ans (156 mois)	Annaba
26	026/2014	B. Raihane	F	27/03/2005	25/02/2014	8 ans, 11 mois (107 mois)	Annaba

27	027/2014	B. Ghofrane	F	08/07/2003	25/02/2014	10 ans, 8 mois (128 mois)	Annaba
28	028/2014	B. Selmane	M	27/09/2009	25/02/2014	4 ans, 5 mois (53 mois)	Annaba
29	029/2014	M. Mohamed Raouf	M	12/04/2007	11/03/2014	6 ans, 11 mois (83 mois)	Cheurfa
30	030/2014	M. Chouaib	M	24/07/2000	11/03/2014	13 ans, 8 mois (164 mois)	Cheurfa
31	031/2014	M. Nouaim	M	20/07/2004	11/03/2014	9 ans, 8 mois (116 mois)	Cheurfa
32	032/2014	B. Ayoub	M	13/10/2008	19/03/2014	5 ans, 5 mois (65 mois)	Sidi Amar
33	033/2014	B. Insaf	F	20/12/2011	19/03/2014	2 ans, 3 mois (27 mois)	Sidi Amar
34	034/2014	R. Khaled	M	04/01/2007	19/03/2014	7 ans, 2 mois (86 mois)	Sidi Amar
35	035/2014	O. Kaouter	F	21/11/2005	16/04/2014	8 ans, 5 mois (101 mois)	Annaba
36	036/2014	O. Malek	F	18/09/2007	16/04/2014	6 ans, 7 mois (79 mois)	Annaba
37	037/2014	G. Anes	M	11/12/2009	27/04/2014	4 ans, 5 mois (53 mois)	Sidi Amar
38	038/2014	G. Aroua	F	19/01/2012	27/04/2014	2 ans, 3 mois (27 mois)	Sidi Amar
39	039/2014	B. Abdelali	M	16/01/2004	29/04/2014	10 ans, 3 mois (123 mois)	Annaba
40	040/2014	B. Akram	M	07/05/2006	29/04/2014	8 ans (96 mois)	Annaba
41	041/2014	B. Abir	F	08/06/2002	29/04/2014	11 ans, 11 mois (143 mois)	Annaba
42	042/2014	B. Islam	M	30/05/2008	06/05/2014	5 ans, 11 mois (71 mois)	Eulma
43	043/2014	B. Anes	M	09/11/2009	06/05/2014	4 ans, 6 mois (54 mois)	Eulma
44	044/2014	B. Raed	M	06/09/2013	06/05/2014	8 mois	Eulma
45	045/2014	H. Abderraouf	M	13/09/2013	14/05/2014	8 mois	/
46	046/2014	S. Malek	F	09/08/2004	08/09/2014	10 ans, 1 mois (121 mois)	Annaba
47	047/2014	O Mohamed	M	16/06/2014	08/09/2014	3 mois	Annaba
48	048/2014	O Ahmed	M	05/02/2007	08/09/2014	7 ans, 7 mois (91 mois)	Annaba
49	049/2014	R. Jihène	F	09/04/2009	10/09/2014	5 ans, 5 mois (65 mois)	Annaba
50	050/2014	M. Salsabil	F	04/06/2008	10/09/2014	6 ans, 3 mois (75 mois)	Annaba
51	051/2014	A. Amor	M	22/08/2012	11/09/2014	2 ans, 1 mois (25 mois)	Annaba
52	052/2014	R. Mohamed	M	16/02/2013	11/09/2014	1an, 7 mois (19 mois)	El-Hadjar
53	053/2014	S. Hiba	F	05/10/2010	11/09/2014	3 ans, 11 mois (47 mois)	/
54	054/2014	M. Fatma Zohra	F	01/09/2011	16/09/2014	3 ans (36 mois)	Annaba
55	055/2014	B. Hadjer	F	29/09/2011	17/09/2014	3 ans (36 mois)	Annaba
56	056/2014	S. Barae	M	31/01/2014	17/09/2014	8 mois	Annaba
57	057/2014	L. Rami	M	12/12/2006	30/09/2014	7 ans, 10 mois (94 mois)	Annaba
58	058/2014	O. Fatma	F	19/03/2006	01/10/2014	8 ans, 6 mois (102 mois)	Annaba

59	059/2014	O. Aicha	F	07/11/2009	01/10/2014	4 ans, 11 mois (59 mois)	Annaba
60	060/2014	M. Ismahène	F	12/09/2012	07/10/2014	2 ans, 1 mois (25 mois)	Annaba
61	061/2014	H. Sofiane	M	08/07/2013	07/10/2014	1 an, 3 mois (15 mois)	Annaba
62	062/2014	S. Abdelmalek	M	13/04/2013	09/10/2014	1 an, 6 mois (18 mois)	/
63	063/2014	L. Fedoua	F	05/05/2013	13/10/2014	1 an, 5 mois (17 mois)	Annaba
64	064/2014	K. Nour Imene	F	20/11/2012	14/10/2014	1 an, 11 mois (23 mois)	Annaba
65	065/2014	B. Alaeddine	M	03/02/2005	14/10/2014	9 ans, 8 mois (116 mois)	Annaba
66	066/2014	B. Lina Samar	F	26/08/2010	16/10/2014	4 ans, 2 mois (50 mois)	Annaba
67	067/2014	B. Mourad	M	07/01/2006	18/10/2014	8 ans, 9 mois (105 mois)	Annaba
68	068/2014	K. Mohcen	M	02/10/2013	21/10/2014	1 an, 1 mois (13 mois)	Annaba
69	069/2014	B. Nour	F	10/11/2004	23/10/2014	9 ans, 11 mois (119 mois)	Annaba
70	070/2014	B. Achraf	M	06/02/2014	26/10/2014	9 mois	Annaba
71	071/2014	M. Rassim	M	17/09/2010	01/11/2014	4 ans, 1 mois (49 mois)	Annaba
72	072/2014	O. Rawen	F	14/01/2011	07/11/2014	3 ans, 10 mois (46 mois)	Annaba
73	073/2014	O. Ayoub	M	19/07/2012	09/11/2014	2 ans, 4 mois (28 mois)	Annaba
74	074/2014	B. Mouad	M	30/11/2012	10/11/2014	1 an, 11 mois (23 mois)	/
75	075/2014	R. Islam	M	11/03/2006	12/11/2014	8 ans, 8 mois (104 mois)	Annaba
76	076/2014	A. Moatez	M	29/10/2011	16/11/2014	3 ans, 1 mois (37 mois)	Annaba
77	077/2014	T. Abderrahim	M	08/04/2010	17/11/2014	4 ans, 7 mois (55 mois)	Annaba
78	078/2014	F. Roumaissa	F	12/11/2012	17/11/2014	2 ans (24 mois)	/
79	079/2014	B. Serine	F	09/10/2013	19/11/2014	1 an, 1 mois (13 mois)	Annaba
80	080/2014	Z. Ghania	F	10/06/2008	19/11/2014	6 ans, 5 mois (77 mois)	Annaba
81	081/2014	T. Meriem	F	01/05/2007	20/11/2014	7 ans, 7 mois (91 mois)	Annaba
82	082/2014	M. Houcine	M	14/02/2008	23/11/2014	6 ans, 9 mois (81 mois)	Annaba
83	083/2014	B. Belkis	F	11/06/2012	24/11/2014	2 ans, 5 mois (29 mois)	Annaba
84	084/2014	D. Iyed	M	04/12/2010	24/11/2014	4 ans (48 mois)	Annaba
85	085/2014	B. Nourelhouda	F	10/10/2005	25/11/2014	9 ans, 1 mois (109 mois)	Annaba
86	086/2014	D. Rahma	F	10/10/2013	26/11/2014	1 an, 2 mois (14 mois)	Annaba
87	087/2014	B. Nadjmeddine	M	14/12/2013	01/12/2014	1 an (12 mois)	Annaba
88	088/2014	B. Hadil	F	02/11/2010	02/12/2014	4 ans, 1 mois (49 mois)	Annaba
89	089/2014	B. Nourelhouda	F	17/01/2006	03/12/2014	8 ans, 11 mois (107 mois)	/

90	090/2014	H. Mohamed	M	22/11/2006	03/12/2014	8 ans (96 mois)	Annaba
91	091/2014	S. Soundous	F	18/12/2012	07/12/2014	2 ans (24 mois)	Annaba
92	092/2014	N. Mohamed Aymen	M	29/11/2013	10/12/2014	1 an (12 mois)	Annaba
93	093/2014	K. Rokaya	F	03/04/2003	22/12/2014	11 ans, 9 mois (141 mois)	Annaba
94	094/2014	B. Ikram	F	03/12/2004	24/12/2014	10 ans, 1 mois (121 mois)	Annaba
95	095/2014	B. Rihem	F	22/02/2013	28/12/2014	1 an, 10 mois (22 mois)	Annaba
96	096/2014	D. Lina	F	09/10/2004	30/12/2014	10 ans, 3 mois (123 mois)	Annaba
97	097/2014	Z. Salsabil	F	11/11/2006	30/12/2014	8 ans, 2 mois (98 mois)	Annaba
98	098/2014	G. Chaima	F	16/11/2009	31/12/2014	5 ans, 1 mois (61 mois)	Annaba
99	099/2015	B. Fouad	M	11/06/2014	06/01/2015	7 mois	Annaba
100	100/2015	B. Adam	M	01/10/2013	07/01/2015	1 an, 3 mois (15 mois)	Annaba
101	101/2015	D. Majid	M	01/02/2008	07/01/2015	6 ans, 11 mois (83 mois)	Annaba
102	102/2015	H. Olfa	F	25/12/2005	11/01/2015	9 ans, 1 mois (109 mois)	Annaba
103	103/2015	H. Zaineb	F	26/02/2007	14/01/2015	7 ans, 11 mois (95 mois)	/
104	104/2015	A. Ayad	M	30/12/2012	19/01/2015	2 ans, 1 mois (25 mois)	/
105	105/2015	B. Malissa	F	09/05/2014	03/02/2015	9 mois	Annaba
106	106/2015	C. Abdeldjalil	M	06/06/2009	16/05/2015	5 ans, 11 mois (71 mois)	Annaba
107	107/2015	A. Khireddine	M	02/11/2004	18/05/2015	10 ans, 7 mois (127 mois)	Annaba
108	108/2015	A. Bouthaina	F	16/04/2001	18/05/2015	14 ans, 1 mois (169 mois)	Annaba
109	109/2015	M. Mohamed	M	27/06/2012	19/05/2015	2 ans, 11 mois (35 mois)	Annaba
110	110/2015	M. Karima	F	06/11/2003	21/05/2015	11 ans, 6 mois (138 mois)	Annaba
111	111/2015	B. Oussama	M	09/04/2009	21/05/2015	6 ans, 1 mois (73 mois)	Annaba
112	112/2015	F. Nesrine	F	13/12/2011	01/06/2015	3 ans, 6 mois (42 mois)	Annaba
113	113/2015	T. Anis	M	10/02/2003	08/06/2015	12 ans, 4 mois (148 mois)	Annaba
114	114/2015	S. Mohamed Zine	M	11/08/2004	10/06/2015	10 ans, 10 mois (130 mois)	Annaba
115	115/2015	L. Abdelmoumen	M	02/06/2014	10/06/2015	1 an (12 mois)	Annaba
116	116/2015	B. Souha	F	05/04/2007	11/06/2015	8 ans, 2 mois (98 mois)	Annaba
117	117/2015	C. Khalil	M	27/05/2010	14/06/2015	5 ans, 1 mois (61 mois)	El-Hadjar
118	118/2015	M. Soumaia	F	20/06/2008	21/06/2015	7 ans (84 mois)	El-Hadjar
119	119/2015	B. Abdelmouaz	M	03/01/2013	27/06/2015	2 ans, 6 mois (30 mois)	El-Hadjar
120	120/2023	C. Abdelmoumen	M	25/05/2007	02/07/2023	16 ans, 1 mois (193 mois)	/
121	121/2023	A. Taha	M	21/08/2011	16/07/2023	11 ans, 11 mois	Sidi Amar

						(143 mois)	
122	122/2023	A. Ranim	F	06/05/2007	14/11/2023	16 ans, 6 mois (198 mois)	Sidi Amar
123	123/2023	A. Rafif	F	09/11/2012	14/11/2023	11 ans (132 mois)	Sidi Amar
124	124/2024	K. abdelmoumen	M	21/10/2008	16/09/2024	15 ans, 11 mois (191 mois)	Annaba
125	125/2024	A. Rouae	F	29/04/2024	19/09/2024	5 mois	Sidi Amar
126	126/2024	G. Anes	M	11/12/2009	19/09/2024	14 ans, 9 mois (177 mois)	Sidi Amar
127	127/2024	G. Aroua	F	19/01/2012	19/09/2024	12 ans, 8 mois (152 mois)	Sidi Amar
128	128/2024	B. Raed	M	01/09/2013	17/09/2024	11 ans, 1 mois (133 mois)	Berrahal
129	129/2024	B. Islem	M	30/05/2008	17/09/2024	16 ans, 4 mois (196 mois)	Berrahal
130	130/2024	B. Anes	M	09/11/2009	17/09/2024	14 ans, 10 mois (178 mois)	Berrahal
131	131/2024	B. Ibrahim	M	21/04/2011	19/09/2024	13 ans, 5 mois (161 mois)	Berrahal
132	132/2024	B. Alae	F	10/01/2013	19/09/2024	11 ans, 8 mois (140 mois)	Berrahal
133	133/2024	R. Zayneb	F	11/05/2011	28/09/2024	13 ans, 5 mois (161mois)	Sidi Amar
134	134/2024	A. Amine	M	15/01/2009	20/10/2024	15 ans, 9 mois (189 mois)	Annaba
135	135/2024	K. Sirine	F	03/03/2009	31/10/2024	15 ans, 8 mois (188 mois)	Sidi Amar
136	136/2024	H. Yasmine	F	02/04/2009	31/10/2024	15 ans, 7 mois (187 mois)	Sidi Amar
137	137/2024	O. Hibat Arrehmane	F	09/01/2011	28/09/2024	13 ans, 9 mois (165 mois)	Annaba
138	138/2024	F. Alae	F	06/12/2007	05/11/2024	16 ans, 11 mois (203 mois)	Sidi Amar

De cette liste exhaustive qui comporte **138 enfants et adolescents**, différentes répartitions se découlent, à base de chiffres et de pourcentages et sous forme de tableaux, donnant une image simple, numérique et correcte sur l'ensemble des déterminants de cet échantillon.

a. <u>La répartition par sexe :</u>

De 138 enfants et adolescents, 68 sont des garçons, soit 49,27 % et 70 sont des filles, soit 50,72 %.

Tableau 39 : La répartition de l'échantillon par sexe

Sexe	Fréquence	Pourcentage
Garçon	68	49,27 %
Fille	70	50,72 %
Total	**138**	**100 %**

b. <u>La répartition par tranches d'âge (civil) et par sexe :</u>

Par souci de suivre l'évolution de la maturation squelettique étape par étape sur les clichés radiographiques, ainsi que le déroulement de la croissance staturopondérale par les mesures anthropométriques, et en tenant compte de la grande diversité des âges ce qui rend l'étude par enfant et par âge difficile, l'échantillon sera divisé en plusieurs catégories d'âge, pour chaque sexe.

En se référant à la méthode de Sempé et à sa façon de créer des tranches d'âge pour son étude [139], et tenant compte de la taille de l'échantillon qui n'est pas assez large (138 enfants et adolescents), il nous a paru logique de diviser notre échantillon en 17 tranches (Tableau 40) qui seront pris en compte dans l'élaboration des résultats par la suite.

Tableau 40 : Les tranches d'âge de l'échantillon, par sexe

Tranches d'âge		Garçons		Filles		Total	
		Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
1	0 mois – < 1 an	6	4,34	4	2,89	10	7,24
2	1 an – < 2 ans	9	6,52	8	5,79	17	12,31
3	2 ans – < 3 ans	9	6,52	7	5,07	16	11,59
4	3 ans – < 4 ans	2	1,44	7	5,07	9	6,52
5	4 ans – < 5 ans	7	5,07	4	2,89	11	7,97
6	5 ans – < 6 ans	6	4,34	3	2,17	9	6,52
7	6 ans – < 7 ans	4	2,89	3	2,17	7	5,07
8	7 ans – < 8 ans	4	2,89	3	2,17	7	5,07
9	8 ans – < 9 ans	4	2,89	9	6,52	13	9,42
10	9 ans – < 10 ans	2	1,44	4	2,89	6	4,34
11	10 ans – < 11 ans	3	2,17	5	3,62	8	5,79
12	11 ans – < 12 ans	2	1,44	5	3,62	7	5,07
13	12 ans – < 13 ans	1	0,72	1	0,72	2	1,44
14	13 ans – < 14 ans	3	2,17	2	1,44	5	3,62
15	14 ans – < 15 ans	2	1,44	1	0,72	3	2,17
16	15 ans – < 16 ans	2	1,44	2	1,44	4	2,89
17	16 ans – < 17 ans	2	1,44	2	1,44	4	2,89
Total		**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

c. La répartition par commune :

La plupart des sujets de l'échantillon habitent la commune d'Annaba, au nombre de 88, soit 63,76 %. Néanmoins, ça reste un petit nombre dont leur domicile n'a pas été identifié, 10 sujets soit 7,24 %.

Tableau 41 : La répartition de l'échantillon par communes

Commune	Garçons		Filles		Total	
	Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
Annaba	41	29,71	47	34,05	88	**63,76**
El-Bouni	2	1,44	6	4,34	8	5,79
El-Hadjar	3	2,17	1	0,72	4	2,89
Sidi Amar	6	4,34	11	7,97	17	12,31
Cheurfa	3	2,17	0	0	3	2,17
Eulma	3	2,17	0	0	3	2,17
Berrahal	4	2,89	1	0,72	5	3,62
Non identifiée	6	4,34	4	2,89	10	7,24
Total	**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

d. La répartition par année de recrutement (date du cliché radiographique) :

L'année 2014 est celle qui présente le nombre élevé des clichés radiographiques, 87 recrutements, soit 63,04 %.

Tableau 42 : La répartition de l'échantillon par années de recrutement

Années de recrutement	Garçons		Filles		Total	
	Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
2012	1	0,72	0	0	1	0,72
2013	3	2,17	7	5,07	10	7,24
2014	42	30,43	45	32,60	**87**	**63,04**
2015	13	9,42	8	5,79	21	15,21
2023	2	1,44	2	1,44	4	2,89
2024	7	5,07	8	5,79	15	10,86
Total	**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

(2) LES CLICHÉS RADIOGRAPHIQUES

Le cliché radiographique, dans cette étude et dans le quotidien médical et chirurgical, est un outil indispensable pour le diagnostic comme pour la recherche. La découverte des rayons X a bouleversé notre vision au corps humain : « l'homme n'était plus seulement transparent. Les images générées par les ordinateurs permettaient désormais de voyager littéralement dans son anatomie » [17].

« La main et le poignet constituent un site classiquement analysé pour calculer l'AO… il est possible d'étudier (plusieurs) centres d'ossification dans un faible volume afin de diminuer au maximum l'irradiation liée à l'acquisition des images » [32].

Dans notre étude, la radiographie a été faite après le recrutement de l'enfant ou de l'adolescent avec bien évidemment, l'accord de consentement des parents, pour lesquels une explication des objectifs de l'étude a été fournie.

Les radiographies du poignet et de la main gauches de face ont été réalisées, à raison d'un (seul) cliché par enfant et adolescent. Tous les clichés obtenus sont des clichés numériques, d'une meilleure qualité d'image, qui donnent accès à plus d'information par la meilleure résolution de contraste, toutes ces qualités permettront par la suite une lecture facile et correcte du cliché.

Les radiographies ont été réalisées principalement au sein de l'hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » et de la clinique Al-Farabi dans la ville d'Annaba. Néanmoins, un petit nombre de clichés a été réalisé dans d'autres Centres d'Imagerie Médicale (Tableau 43).

Les clichés radiographiques réalisés obéissent tous, aux « critères de qualité » (Fig. 120), préparés et communiqués aux équipes médicale et paramédicale, au préalable.

A. L'appareillage et le protocole d'imagerie :

Comme c'est mentionné plus haut, la prise des clichés radiographiques a été faite principalement au sein de l'hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » et de la Clinique Al-Farabi. Voici un aperçu sur l'appareillage et le protocole d'imagerie au sein de chaque hôpital.

a. <u>Dans la clinique pédiatrique « Sainte Thérèse »</u>

La « Salle de Radiologie » comporte deux chambres qui s'ouvrent l'une sur l'autre, (1) la salle d'examen, la grande, muni d'un appareil à rayons X sur rail plafonnier avec une table mobile qui servent à la réalisation de toutes sortes d'examens radiographiques, et (2) le poste de contrôle, la petite, comporte une station de numérisation constituée d'un numériseur qui dispose d'une console de traitement, d'une imprimante des clichés radiographiques de marque Dry Pix et de lecteur mono fente des plaques (cassettes) ERLM.



Figure 117 : La salle de Radiologie, Hôpital pédiatrique

Le procédé de la numérisation, utilise une cassette phosphore ou plaque ERLM qui sera placée sous la région de la main et du poignet gauche de l'enfant ou de l'adolescent ; après irradiation, la cassette qui contient une image latente, sera ensuite insérée dans le lecteur d'ERLM, où ses données seront traitées et visualisées sur un écran puis imprimées sur un film.



Figure 118 : Imprimante des clichés radiographiques, Dry Pix

La prise des clichés radiographiques du poignet et de la main gauches a été faite par la technicienne « Rachida », tout en respectant les consignes de la « Fiche des critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face », détaillée plus bas.

b. <u>Dans la Clinique Al-Farabi</u>

De même, la « Salle de Radiologie Conventionnelle » comporte, (1) la salle d'examen, muni d'un appareil à rayons X sur rail plafonnier avec une table mobile qui servent à la réalisation des examens radiographiques, et (2) le poste de contrôle, comportant une station de numérisation constituée d'un numériseur qui dispose d'une console de traitement, d'une imprimante et de lecteur mono fente des plaques ERLM.



Figure 119 : L'appareillage de la radiographie numérique, type SIEMENS AXIOM Luminos dRF

Le procédé de la numérisation est de la même façon que celui de la clinique pédiatrique.

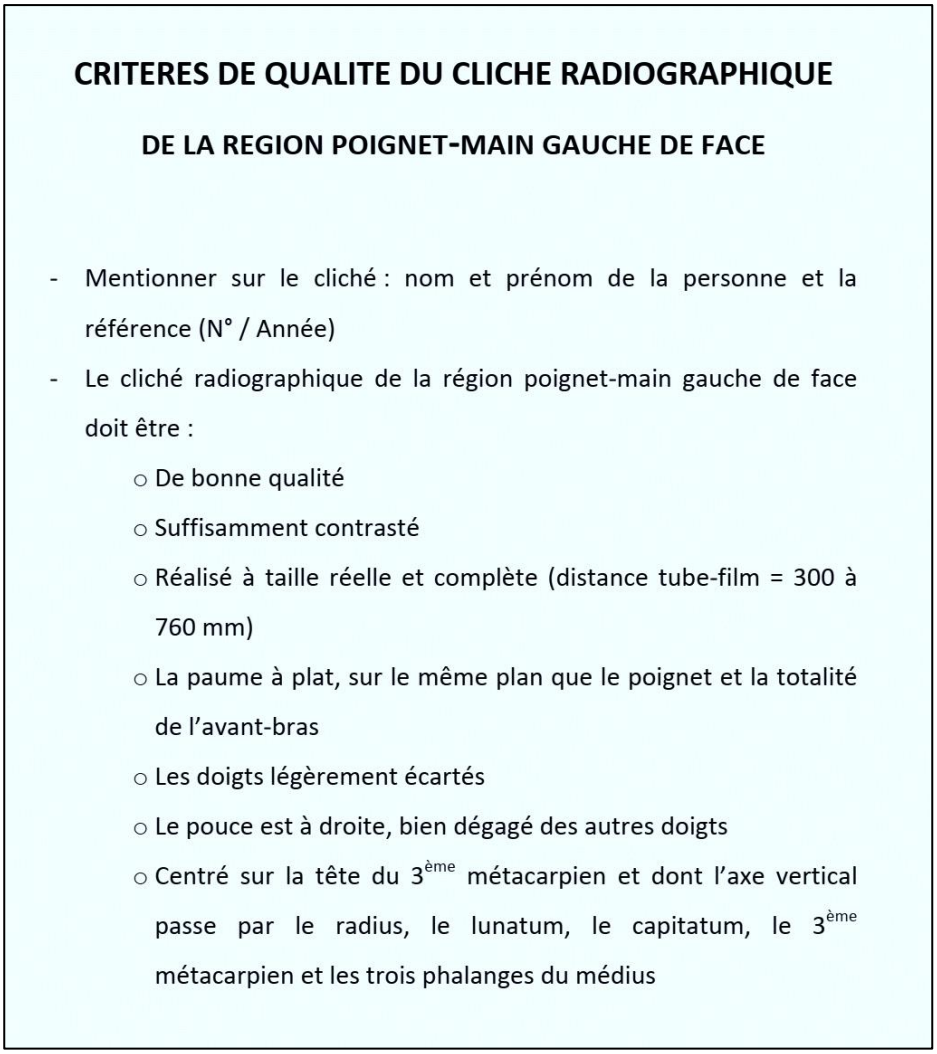
La prise des clichés radiographiques du poignet et de la main gauches a été faite par la technicienne « Hamida » et ses collaboratrices, tout en respectant les consignes de la « Fiche des critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face ».

B. Les critères de qualité :

Les « Critères de qualité » d'un cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face est une « matrice de consignes » indispensable, et sa détermination est une étape préalable à toute prise de clichés.

Ces critères rassemblent ce qu'il faut « faire » et ce qu'il faut « éviter », c'est-à-dire des instructions qui font adapter l'acte de « radiographier » selon les recommandations dictées par les méthodes d'évaluation de l'AO basées sur le poignet et la main de façon générale, la méthode de Sempé en particulier.

En ci-après, la fiche de « Critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face » (Fig. 120) selon laquelle, tout cliché radiographique de cette étude est réalisé (Voir aussi dans : ANNEXES).



CRITERES DE QUALITE DU CLICHE RADIOGRAPHIQUE

DE LA REGION POIGNET-MAIN GAUCHE DE FACE

- Mentionner sur le cliché : nom et prénom de la personne et la référence (N° / Année)
- Le cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face doit être :
  - De bonne qualité
  - Suffisamment contrasté
  - Réalisé à taille réelle et complète (distance tube-film = 300 à 760 mm)
  - La paume à plat, sur le même plan que le poignet et la totalité de l'avant-bras
  - Les doigts légèrement écartés
  - Le pouce est à droite, bien dégagé des autres doigts
  - Centré sur la tête du 3ème métacarpien et dont l'axe vertical passe par le radius, le lunatum, le capitatum, le 3ème métacarpien et les trois phalanges du médius

Figure 120 : Fiche de « Critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face »

Cette « fiche » est rédigée à partir de plusieurs lectures bibliographiques sur la radiographie de la région poignet-main, notamment celles en rapport avec la méthode de Sempé [4, 21-24, 86, 121, 137, 139].

La fiche des « Critères de qualité » insiste au début, sur le point de « classement et archivage du dossier » de l'enfant et de l'adolescent, en mentionnant sur chaque cliché, et sur le dossier par conséquent, le « nom et prénom » de la personne et en donnant une référence en série comme suit : « N° / Année ».

La fiche dicte aussi un certain nombre de points importants pour une bonne qualité, un centrage correct et un dégagement de l'image du poignet et de la main gauches, comme suit :

- Région anatomique : poignet et main gauches ;
- Incidence : face, postéro-antérieure (PA) ;
- Taille : réelle et complète ;
- Centrage : sur la tête du 3ème métacarpien ;

- Axe : vertical ; passe par : radius, lunatum, capitatum, 3ème métacarpien, phalanges du médius ;
- Position de la paume : à plat sur la cassette, sur le même plan que le poignet et l'avant-bras ;
- Position des doigts : légèrement écartés ;
- Position du pouce : à droite, bien dégagé des autres doigts.

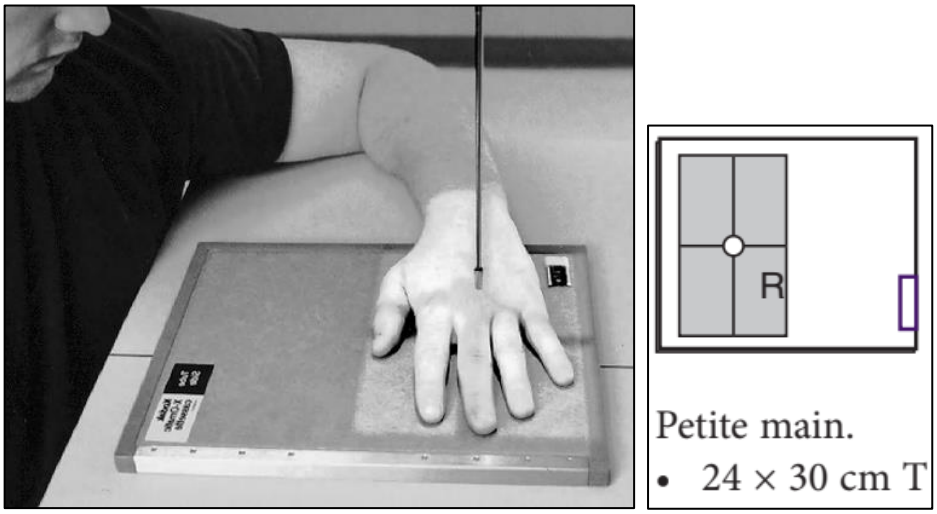


Figure 121 : main et poignet gauches, incidence face, PA [22]

C. Les clichés radiographiques de l'étude, en chiffres :

En ci-dessous, le tableau 43 résume la répartition de l'échantillon par origine (source) du cliché radiographique et par sexe.

La Clinique pédiatrique « Sainte Thérèse » est celle qui a présenté le nombre élevé des clichés radiographiques, 74 clichés radiographiques, soit 53,62 %.

Tableau 43 : La répartition de l'échantillon par origines des clichés radiographiques

Origines des clichés radiographiques	Garçons		Filles		Total	
	Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
Clinique pédiatrique « Sainte Thérèse »	36	29,08	38	27,53	74	53,62
Clinique Al-Farabi	22	15,94	22	15,94	44	31,88
Autres centres d'imagerie médicale (CIM)	10	7,24	10	7,24	20	14,49
Total	**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

D. L'anatomie radiologique du poignet et de la main

De point de vue anatomique, la région du poignet et de la main, bien qu'elle soit « petite », elle est « riche » en os, osselets et articulations. Elle est formée d'un squelette ostéo-articulaire, comportant :

- Deux **épiphyses distales**, celle du radius et celle de l'ulna ;
- Un **carpe**, formé de 8 os courts ;
- Un **métacarpe**, formé de 5 os longs ;
- Des **phalanges**, en nombre de 14 os longs ;
- Des **os sésamoïdes**, les plus constants sont ceux du pouce, qui sont au nombre de 2 ;
- Des **articulations**, au nombre de 27 articulations synoviales.

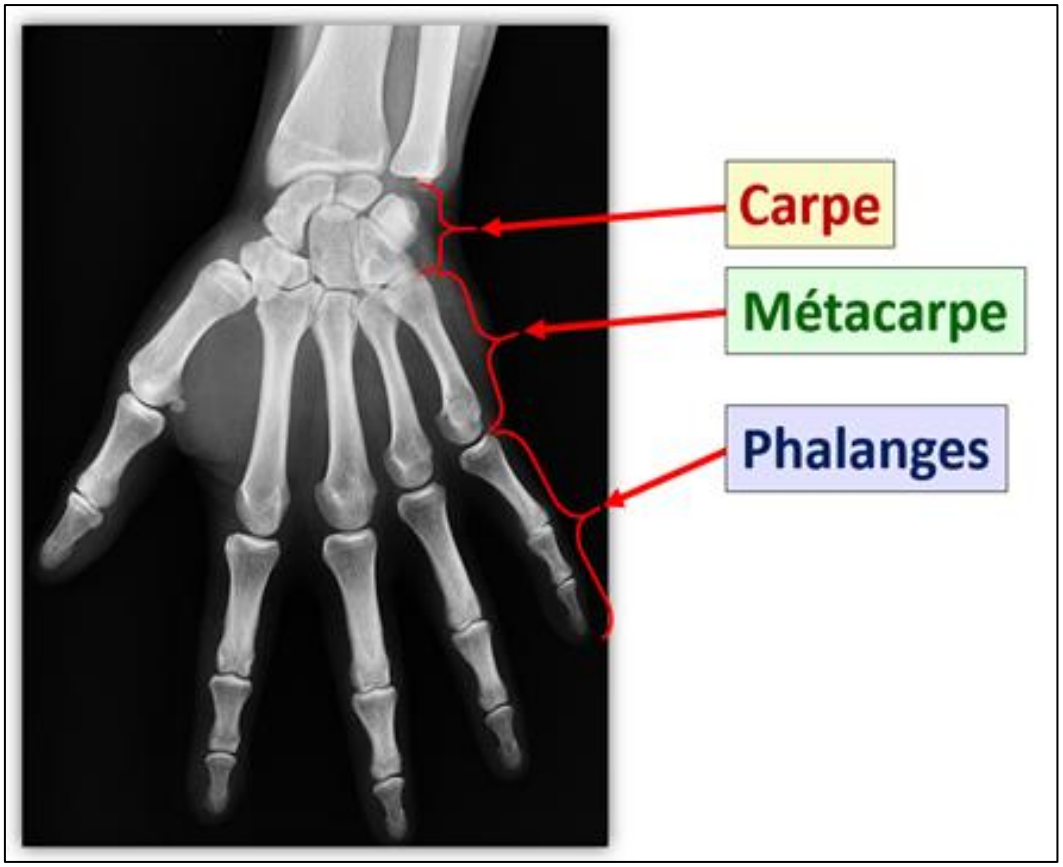


Figure 122 : La division anatomique de la main
https://www.imageriemedicale13.fr/details-passer+une+radiographie+de+la+main+du+poignet+ou+du+doigt-98.html

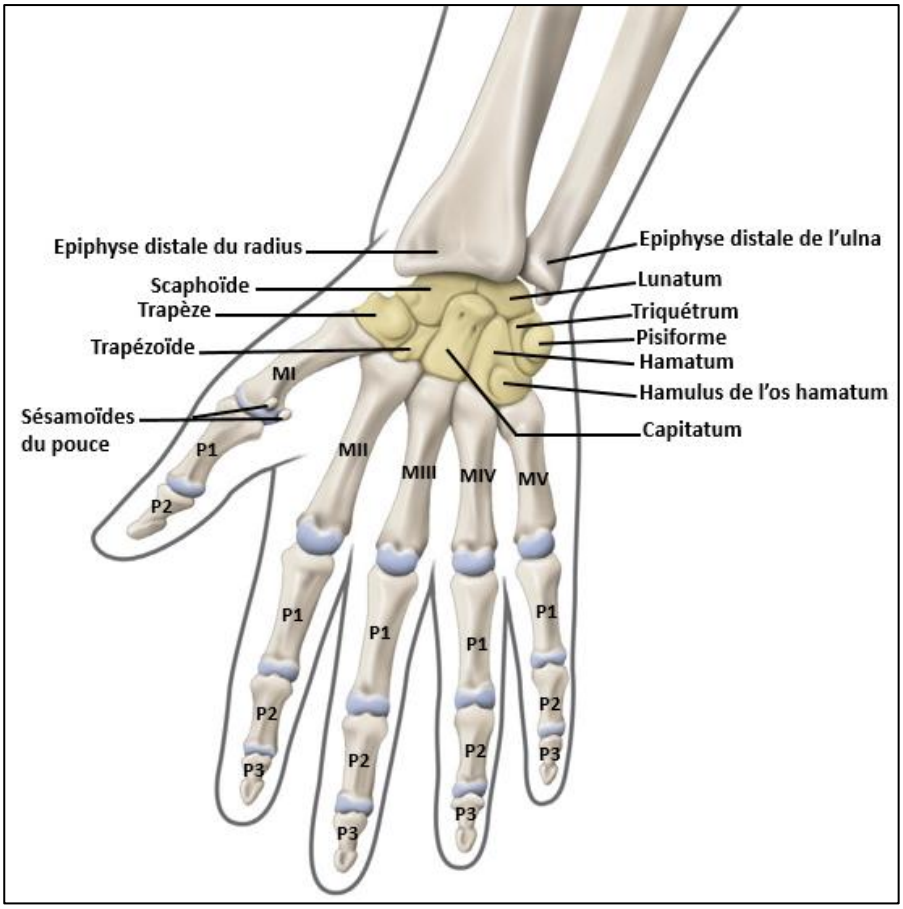


Figure 122 bis : Les os et les osselets du poignet et de la main [90]

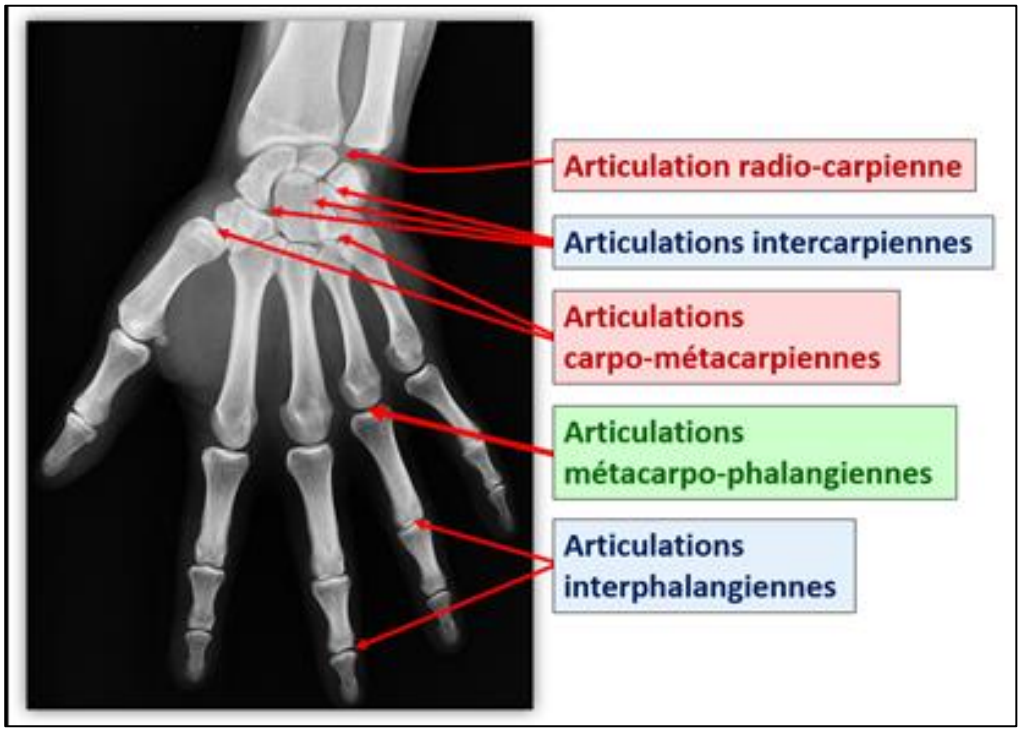


Figure 123 : Les articulations de la main

https://www.imageriemedicale13.fr/details-passer+une+radiographie+de+la+main+du+poignet+ou+du+doigt-98.html

De point de vue radiologique, c'est facile de distinguer un cliché du poignet et de la main d'un enfant, d'un adolescent ou d'un adulte.

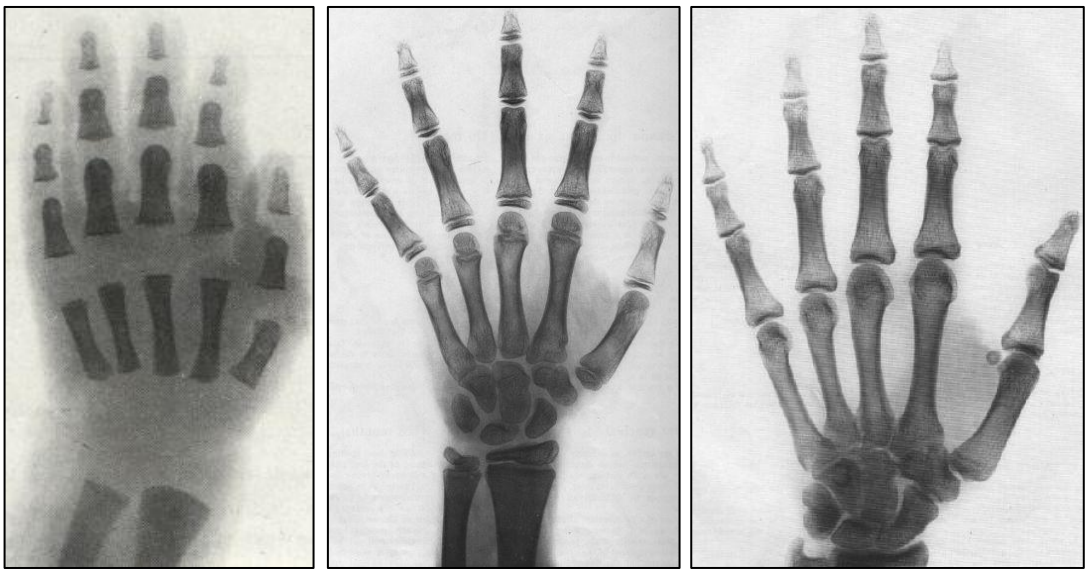


Figure 124 : Radiographie du poignet et de la main d'un enfant (à gauche), d'un adolescent (au milieu) et d'un adulte (à droite). [139]

Cette distinction est basée sur une notion anatomique de base, qui est l'ossification secondaire des os courts (du carpe) et des épiphyses des os longs (radius, ulna, métacarpiens et phalanges) qui débute après la naissance et se termine à l'âge adulte.

- Sur le premier cliché de la main (à gauche) : l'ensemble des os du carpe est absent à la naissance, de même, les noyaux d'ossification secondaire des métacarpiens, des phalanges et des os de l'avant-bras apparaissent au cours de la croissance, alors que le tous sont déjà présents sous forme d'ébauches cartilagineuses radio-transparentes ;
- Sur le deuxième cliché de la main (au milieu) : ça reste encore beaucoup de cartilages de croissances radio-transparents qui vont permettre encore une certaine croissance bien distingués des os. Aussi, tous les os courts du carpe sont ossifiés et leur maturation est pratiquement terminée. Tout ça, au moment du pic de croissance de l'adolescence ;
- Sur le troisième cliché de la main (à droite) : toutes les épiphyses sont fusionnées, les structures cartilagineuses sont ossifiées et parfaitement visibles à la radiographie. C'est l'aspect adulte de la main.

(3) LE LOGICIEL MATUROS® 4.0

L'étape qui suit celle de la collecte des clichés radiographique est la lecture de ces clichés.

La lecture des clichés radiographiques est aussi une étape primordiale, elle permet de calculer en pourcentage le taux de maturation squelettique et de déduire par conséquent en année l'AO. Cette étape permet ensuite de tracer le schéma d'ossification, de faire toutes les corrélations nécessaires avec l'AC, les mesures anthropométriques et le SSE, pour acquérir une vision générale et correcte sur l'état de la maturation squelettique de chaque enfant et adolescent.

Mais la question qui se pose juste avant d'entamer l'étape de lecture des clichés radiographiques est : qu'elle est la méthode d'évaluation de la maturation osseuse qui doit être adoptée pour faire cette lecture ?

A. Le choix de la méthode :

Un très grand nombre de méthodes ont été fondées pour évaluer la maturation osseuse sur le squelette appendiculaire (clavicule, coude, main, genou, pied, etc…), utilisant la radiographie standard et les autres outils d'imagerie médicale (voir sur la partie théorique, le chapitre : méthodes d'évaluation de la maturation squelettique).

Parmi toutes ces méthodes, apparaissent celles basées sur « la radiographie de la région du poignet et de la main » en tête, du fait de leur utilisation fréquente, leur simplicité connue et leurs résultats fiables. On cite ici, la méthode (américaine) de Greulich et Pyle (GP), la méthode (britannique) de Tanner et Whitehouse (TW) et la méthode (française) de Sempé.

Et parmi ces trois méthodes ainsi citées, c'est la dernière méthode, celle de Sempé, qui a été adoptée par notre étude, bien qu'elle n'échappe pas à de quelques limites et critiques.



Figure 125 : Le Professeur Michel SEMPE (1930-2020)
(https://th.bing.com/th/id/OIP.mpb0On-LAsCo2b5RnOAwWgAAAA?rs=1&pid=ImgDetMain)

Ce choix est fait, en tenant compte de nombreuses considérations pratiques et rationnelles.

a. <u>Pourquoi la méthode de Sempé ?</u>

Le choix de la méthode de Sempé pour évaluer la maturation squelettique des enfants et des adolescents de notre échantillon, est basé sur plusieurs critères, dont quelques-uns ont été étalés dans les chapitres précédents (voir: méthodes d'évaluation de la maturation squelettique, la méthode de Sempé).

Toutefois, ce choix vient en deuxième position, il est précédé par un premier choix, qui est la région du poignet et de la main, pourquoi elle et non d'autres régions ou articulations ?

Pour cette raison, les arguments qui sont avancés ci-dessous, expliquent les deux choix, ils seront distingués en deux groupes, l'un commun et l'autre particulier.

- **Les critères communs :**

  Ce sont des critères en commun entre les méthodes qui se basent sur la « radiographie de la région du poignet et de la main gauche de face », entre autre celle de Sempé. Plusieurs études [23, 55, 135, 137] ont montré les avantages d'une telle radiographie, comme suit :

  - Elle est unique, mais facilement reproductible si nécessité ;
  - Elle est indolore ;
  - Elle est sans danger pour les enfants et les adolescents ;
  - Elle est sans risque, avec un minimum d'irradiation ;
  - Elle est peu coûteuse ;
  - Elle ne nécessite pas d'équipement particulier, et la technique radiographique est simple ;
  - Elle intéresse une région anatomique petite et accessible (main et poignet) ;
  - Elle permet d'étudier un maximum d'indicateurs avec un minimum d'irradiation ;
  - Elle est suffisamment riche en indicateurs osseux isolables (33 os, épiphyses et sésamoïdes), plus qu'au niveau de toutes les autres articulations réunies ;
  - Elle est suffisamment utile sans avoir besoin d'un cliché de profil, puisque la position des indicateurs de maturation est précise et leurs rapports sont bien déterminés ;
  - Elle peut être embrassée d'un coup d'œil puis analysée par comparaison avec beaucoup de facilités, puisque les indicateurs sont juxtaposés les uns à côté des autres.

En bref, et selon Sempé : « le choix du poignet et de la main… est un gain de temps, d'argent et d'expérience considérable que de pouvoir localiser son attention sur une seule radiographie ».

- **Les critères particuliers :**

  Ce sont des critères qui ne concernent que la méthode de Sempé, et qui expliquent notre tendance et répondent à la question : pourquoi ?...

  - Parce que la méthode de Sempé est récente.

    Elle a été proposée en 1979, puis mise à jour plusieurs fois par le fondateur lui-même : actualisée en 1986 [87], sa version informatisée « MATUROS 1.0 », éditée en 1988 et enfin l'évolution dernière de cet outil « MATUROS 4.0 CD », publiée en 2001 [24, 42];
  - Parce que la méthode de Sempé est testée sur une longue durée.

    Elle s'est basée sur une enquête auxologique française séquentielle, c.-à-d. longitudinale, unique en son genre, menée pendant plus de 20 ans (1953-1974) sur la même population d'enfants et d'adolescents français, en bonne santé, suivis tout au long de leur croissance, depuis leur naissance jusqu'aux approches de leur maturité. C'est une méthode qui a été testée et vérifiée sur le même échantillon formé de 588 infants recrutés, cumulant plus de 5000 clichés radiographiques [23, 24, 42, 135, 139] ;

    L'Atlas de Sempé et Pavia intègre alors, la notion d'évolution longitudinale, et donc le principe de « standards » est basé sur des critères objectifs [24].
  - Parce que la méthode de Sempé est intégrale.

    Elle intègre et exploite toutes les structures anatomiques qui constituent la région du poignet et de la main sans exception : les osselets, les épiphyses et même les sésamoïdes [23, 134], car tous ces indicateurs interviennent à des moments différents pour « peser » plus ou moins fort dans le résultat de maturation osseuse attendu [134] ;
  - Parce que la méthode de Sempé est précise.

    Elle calcule le taux de la maturation squelettique de chaque indicateur osseux à part, c'est-à-dire, os par os. Cette nécessité de lire séparément les différents indicateurs de maturation, un à un et non globalement, n'est pas uniquement pour ne pas perdre aucune des caractéristiques discriminantes qu'il possède chacun au décours de son évolution [134], puisque les indicateurs osseux se caractérisent par leur « non synchronisation », à la fois dans le moment de leur apparition et dans la durée de son apparence [135], mais aussi pour minimiser les variabilités inter-observateurs [40] ;

- Parce que la méthode de Sempé est objective.

  Elle est numérique, c'est-à-dire elle fait appel à une cotation séparée des différents points d'ossification, leur total aboutit à une cotation globale ou score qui indiquera le stade de maturation osseuse [4, 23, 42, 86, 121].

  La raison de l'émergence de ces méthodes numériques explique leur objectivité. En fait, l'asynchronisme de maturation des centres d'ossification ne permet pas toujours de superposer la radiographie à étudier avec celles de l'atlas. C'est pourquoi certains auteurs, dont Sempé, ont proposé une méthode de cotation chiffrée dans laquelle chaque centre d'ossification est analysé séparément et affecté d'un coefficient [32].

  Dans ce sens, les méthodes numériques actuelles, telle celle de Sempé, bien qu'elles soient un peu complexes, semblent être plus fiables que les méthodes qui se basent sur des atlas, et apporter une précision incontournable en recherche clinique [24, 32, 135].

  L'approche de Sempé, est de devoir faire une grande confiance à l'évolution des images radiologiques et de traduire leur progression vers la maturité complète, en valeurs numériques de maturation osseuse et non par un système de comparaison à des "standards" inappropriés à la population d'un pays [134]. Autrement dit, au lieu d'une approximation chronologique utilisant la notion si imprécise d'âge, il est assurément plus satisfaisant de disposer d'un ensemble de chiffres, pour situer le niveau de progression de la maturation des indicateurs [137] ;

- Parce que la méthode de Sempé est automatisée.

  Elle s'est devenue plus pratique dans son utilisation, plus facile dans sa manipulation et plus rapide dans ses résultats. Cela est dû à son automatisation par l'édition d'un outil informatique dit « Maturos », qui est la version informatisée de la méthode numérique de Sempé et fondée sur ses travaux [23, 121].

  L'utilisation des méthodes de détermination de l'AO assistée par ordinateur, comme celle de Sempé, a permis d'améliorer sa précision et de diminuer le risque d'erreur lié à l'interprétation radiographique [32] ;

- Parce que la méthode de Sempé traite un échantillon « méditerranéen », « proche ».

  Les organisateurs de l'enquête auxologique française, présidée et dirigée par le Professeur Sempé, ont choisi de constituer leur échantillon, en faisant appel à des familles volontaires, résidant dans une zone géographique limitée, Paris et sa proche banlieue puis Lyon

et appartenant à différentes catégories socio-économiques [94, 137]. Cet échantillon est français certes, mais appartient à une dimension géographique plus vaste, le bassin méditerranéen auquel l'Algérie en général et la région d'Annaba en particulier font partie.
Cependant, cet aspect « géographique » de la question ne figure pas dans la plupart des études traitant la maturation squelettique (!!).
La « situation géographique » des sujets qui composent un échantillon donné est un trait important qui explique en partie notre choix de la méthode de Sempé. En effet, l'Algérie, comme la France, est un pays du littoral méditerranéen, dont elle partage avec tous les pays « méditerranéens », entre autre la France elle-même, plusieurs points en commun qui créent des échanges accrus agissant sur toutes les couches populaires et « rendent les populations méditerranéennes proches et non divergentes » [75, 118].

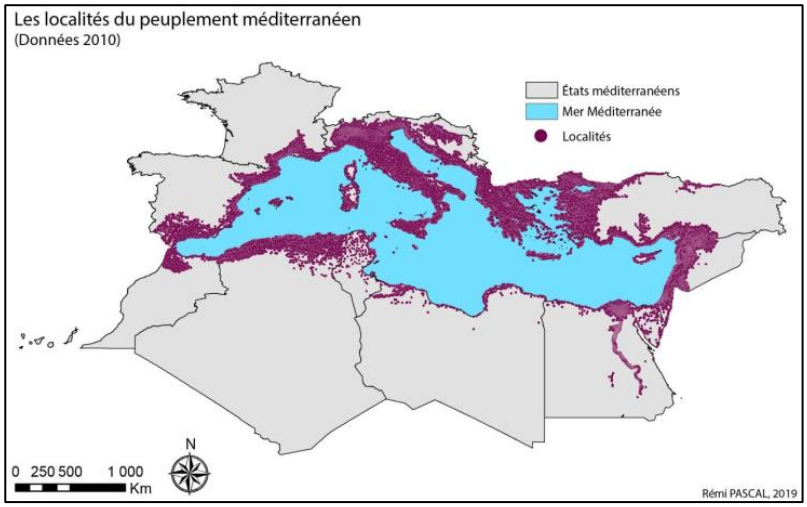


Figure 126 : Les localités du peuplement méditerranéen en 2010 [118]

Le bassin méditerranéen est un véritable carrefour où s'entrecroisent, quelquefois fusionnent, plusieurs facteurs « transformant les pays jouxtant la Méditerranée en une unité, car les ressemblances sont plus flagrantes que les nuances » [118].
Parmi ces facteurs communs [9, 29, 75, 118] :

(1) Le climat méditerranéen, considéré comme l'unité essentielle de la Méditerranée, c'est un climat très particulier semblable d'un bout à l'autre de la mer ;
(2) La nature et le paysage, la nourriture et l'agriculture (vigne, blé et olivier) ;
(3) L'histoire, de la paix et des affrontements ;
(4) Les civilisations, les religions, les cultures et les ethnies ;
(5) Les conquêtes et la colonisation ;

(6) Les immigrations, parfois massives, les récentes et les étendues dans l'histoire ;
(7) Les relations, les échanges économiques, les mariages, les voyages et le tourisme ;
(8) L'industrialisation, la modernisation et l'urbanisation. etc…

Afin de circonscrire la parole sur cette question, en la rattachant avec notre étude sur la maturation et la croissance, il est important de conclure que « c'est bien ces rivages (de la méditerranée) qui ont vu naître le même Homme cultivé, pensant, artiste et scientifique », et qu'« il y a des similitudes entre les sociétés méditerranéennes » au point que « le peuple méditerranéen a unifié la Méditerranée comme le serait une seule et même société » [118].

Après toutes ces conclusions, et pour ne pas aller trop loin avec les derniers propos, en récapitulant : « même croissance », et « même maturation »… il faut dire en fait, que tout ce qui a été cité comme « facteurs » plus haut (mésologiques, climatiques, socio-économiques, nutritionnels, etc…), sont exactement les facteurs qui influencent la maturation squelettique (voir chapitre : Développements), et que lorsque ces facteurs sont « communs », la maturation le serait aussi.

On peut conclure, avec réserve bien évidemment, que notre échantillon est relativement proche de celui de l'étude de Sempé, plus que des échantillons des méthodes connues et utilisées (GP et TW). La méthode de Sempé est la plus adaptée à l'étude de la maturation squelettique chez les enfants et les adolescents de notre échantillon, mieux que les méthodes américaines et britanniques.

b. L'approche de la méthode de Sempé

L'approche de la méthode de Sempé en matière d'évaluation de la maturation squelettique est déjà faite (voir : méthodes d'évaluation de la maturation squelettique, la méthode de Sempé). On se contente de rappeler l'approche concernant trois points pratiques, qui sont les étapes d'ossification, l'ordre de lecture d'un cliché radiographique et le calcul des totaux.

- **Les étapes d'ossification :**

  Le phénomène maturatif va permettre de passer d'un modèle cartilagineux radiotransparent à la naissance, coté à 0 % de maturation, à un aspect adulte radio-opaque achevé, évalué à 100 % de maturation. Ce phénomène maturatif est le même pour chaque centre ou point d'ossification, et se déroule en trois étapes [23, 137] :

  1- L'auxogénèse : est la formation de la structure osseuse, quantifiée par les lettres (Q, P, N). L'évaluation de la maturation à ce stade,

consistera à apprécier l'apparition et les variations de volume du point d'ossification.

2- La morphogénèse : est l'acquisition de l'os (ou de l'osselet) d'une forme adaptée à sa fonction, et quantifiée par les lettres (M, L, K). L'évaluation de la maturation à ce stade, consistera à apprécier les modifications de forme de l'os et l'apparition de reliefs osseux et de lignes denses.

3- La 3ème étape, présente deux aspects : La synostogénèse, qui est la fusion des épiphyses aux métaphyses ; ou L'arthrogénèse, qui est l'articulation des osselets entre eux, comme au niveau du carpe. Cette étape, à double aspects, est quantifiée par les lettres (R, S, T), et aboutit à l'aspect adulte.

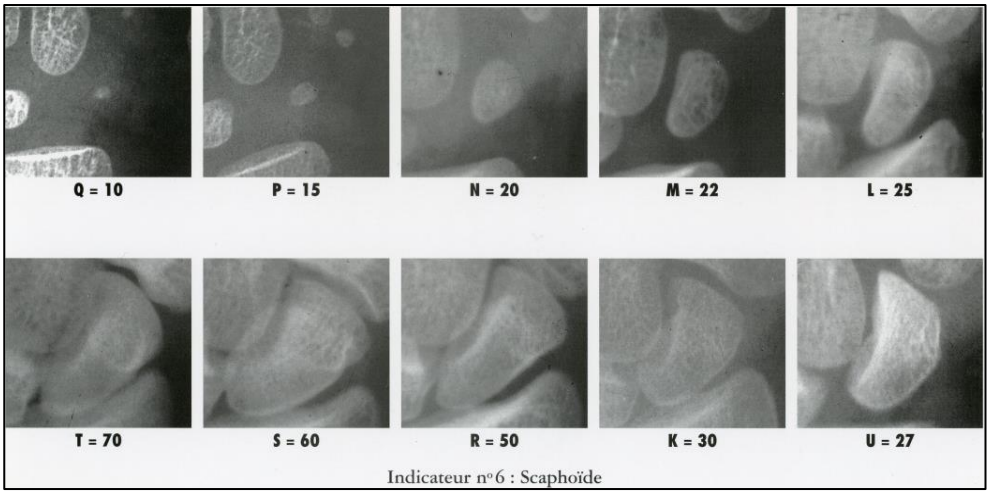
- **Ordre de lecture :**

Avant toute analyse, le cliché radiographique doit être orienté : poignet en bas, les phalanges vers le haut et le pouce à droite de la main [24].

De façon générale, l'analyse de la maturation squelettique chez Sempé suit l'une des deux démarches, soit la démarche classique, en comparant la radiographie du poignet et de la main gauches à la « réglette des indicateurs » [136], extraite de l'Atlas de Sempé et Pavia ; soit la démarche actuelle, utilisant le Logiciel Maturos (voir plus loin).

L'analyse utilisant la démarche classique, procède en trois étapes [87, 134] :

- (1) apparier les images radiographiques étudiées à celles de référence reproduites, dans l'ouvrage exposant la méthode ;
- (2) mémoriser la similitude la plus plausible en utilisant la lettre-repère indiquée ;
- (3) saisir l'information ainsi décryptée en additionnant les valeurs numériques.



Indicateur n° 6 : Scaphoïde

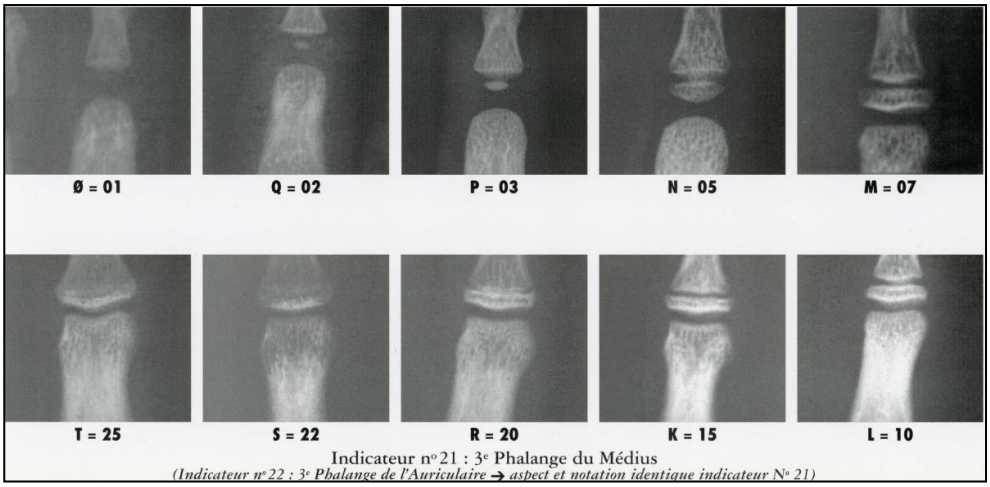


Figure 127 : La réglette des indicateurs (de Sempé). En haut : Os Scaphoïde (indicateur n°6), en bas : 3ème phalange de Médius (indicateur n°21) [136]

Le cliché radiographique du poignet et de la main gauches de face porte des « indicateurs osseux » de la maturation squelettique, représentés par 33 osselets, sésamoïdes et épiphyses ; la lecture se fait sur 22 de ces 33 indicateurs, et suit un ordre toujours le même, correspondant à l'ordre d'apparition habituel des « centres d'ossification » [23, 24].
L'ordre de lecture de la radiographie du poignet et de la main gauches de face est décrit ci-dessous [23, 24] :

- (a) <u>Les os courts du poignet (os du carpe) :</u>
  En commençant par le capitatum (1), l'hamatum (2), le triquétrum (3), le pisiforme (4), le lunatum (5), le scaphoïde (6), le trapèze (7) et le trapézoïde (8). [Lus dans le sens inverse des aiguilles d'une montre] ;
- (b) <u>Les épiphyses (distales) des os longs du poignet :</u>
  Le radius (9) et l'ulna (10) ;
- (c) <u>La colonne du pouce :</u>
  L'épiphyse proximale du premier métacarpien (11), l'épiphyse proximale de la 1ère phalange (12), l'épiphyse proximale de la 2ème phalange (13) et les sésamoïdes 1 et 2 (14) [qui ne sont comptés que pour 1] ;
- (d) <u>Le médius (doigt III) et l'auriculaire (doigt V) :</u>
  L'épiphyse distale des métacarpiens (15 et 16), l'épiphyse proximale des 1ères phalanges (17 et 18), l'épiphyse proximale des 2èmes phalanges (19 et 20) et l'épiphyse proximale des 3èmes phalanges (21 et 22).
  N.B. : L'index et l'annulaire ne seront pas décomptés pour équilibrer l'apport du carpe et des os longs.

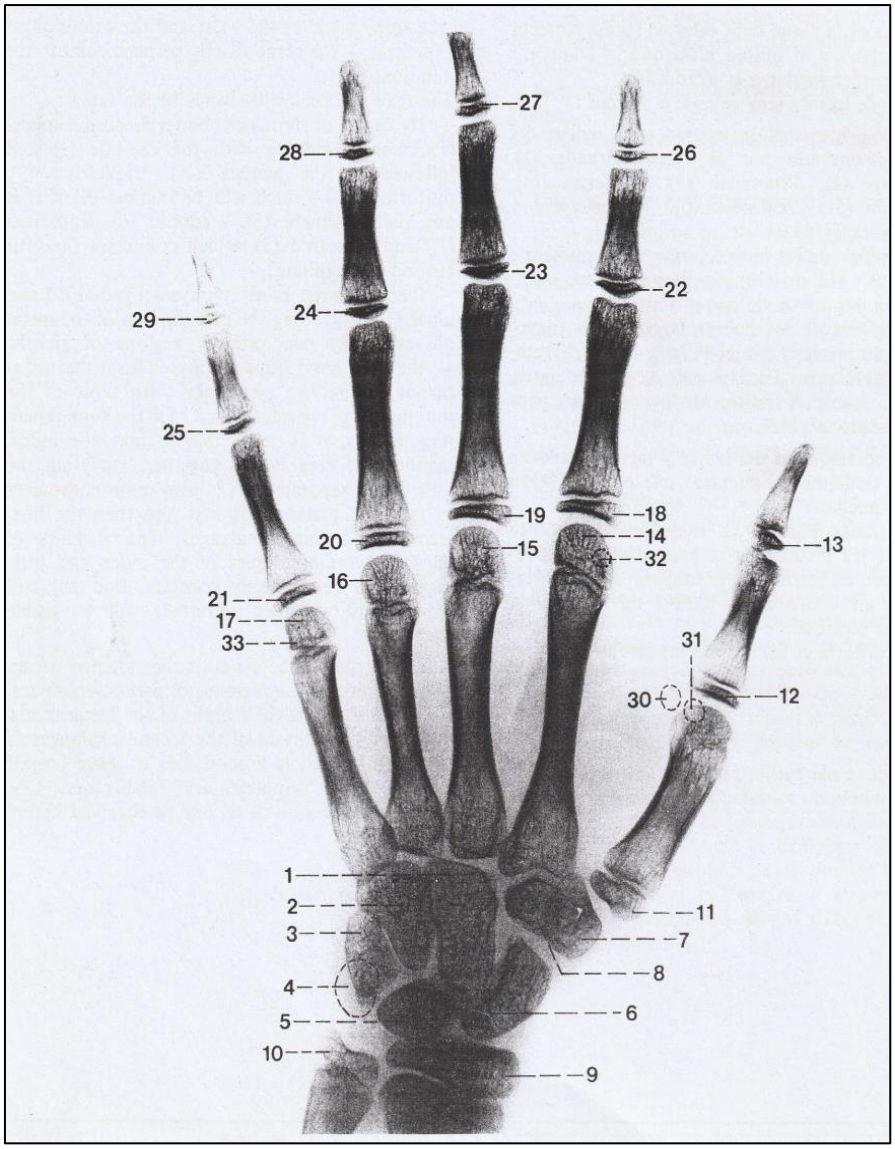


Figure 128 : Les 33 indicateurs osseux de maturation (osselets, sésamoïdes et épiphyses) sur un cliché radiographique du poignet et de la main gauches de face. [139]

- **Le calcul des totaux :**

  Il se fait comme suit [23, 24, 137] :

  - On décrit 10 degrés de maturation pour chaque indicateur (O, Q, P, N, M, L, K, R, S, T), sauf pour le pisiforme et les sésamoïdes ;
  - A chaque degré maturatif, correspond une « note » de maturation adaptée, qui sera attribuée ;
  - Les totaux numériques des degrés de maturation ainsi obtenus « transcodent » l'état de la maturation squelettique et fournissent une note allant de 0 à 999, soit de 0 à 100 % de la maturation squelettique attendue ;
  - À la fin de l'examen, l'addition de toutes les « notes » permet d'obtenir le pourcentage exact de maturation squelettique, de 0 % à

la naissance à 100 % à l'âge adulte, résultat qui peut ensuite être converti en équivalent « âge osseux ».

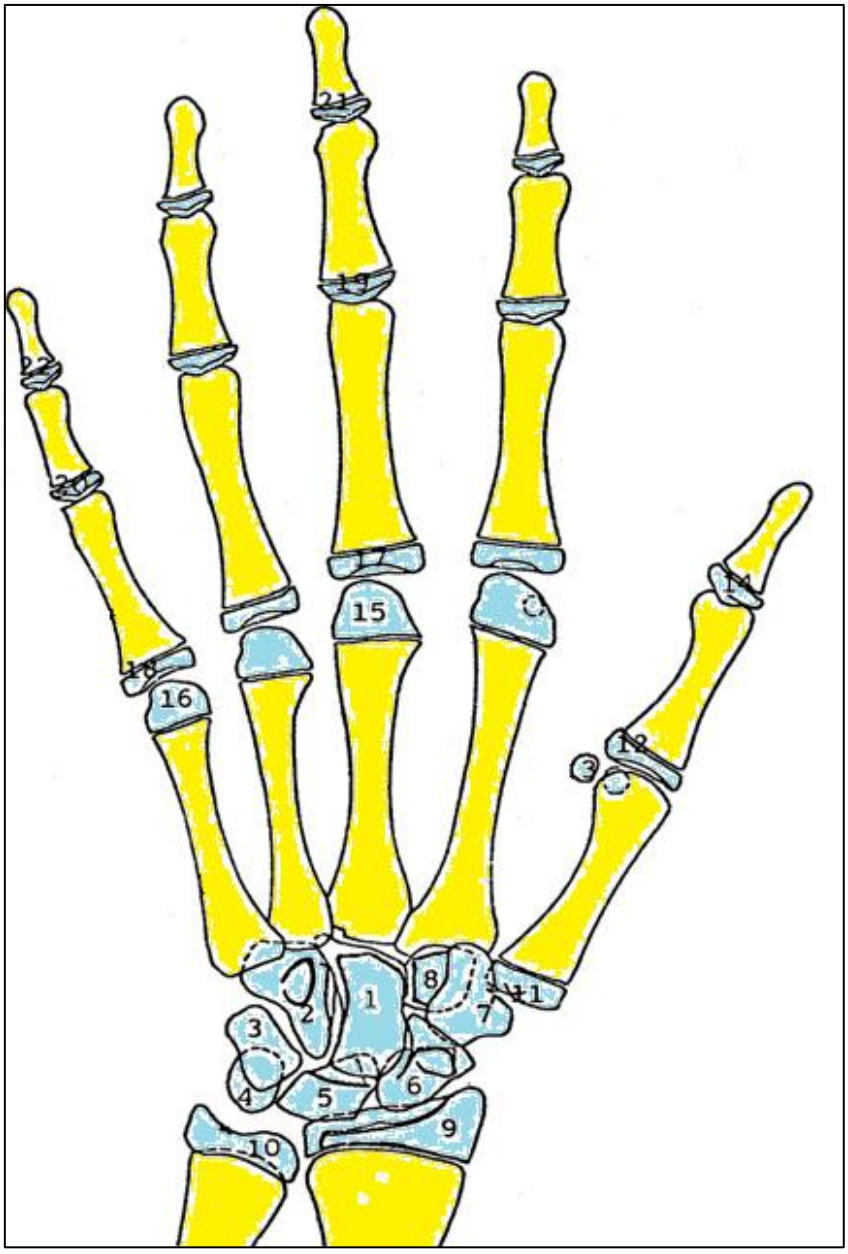


Figure 129 : Schéma des 22 indicateurs de maturation concernés par la lecture de l'AO, chez Sempé [137]

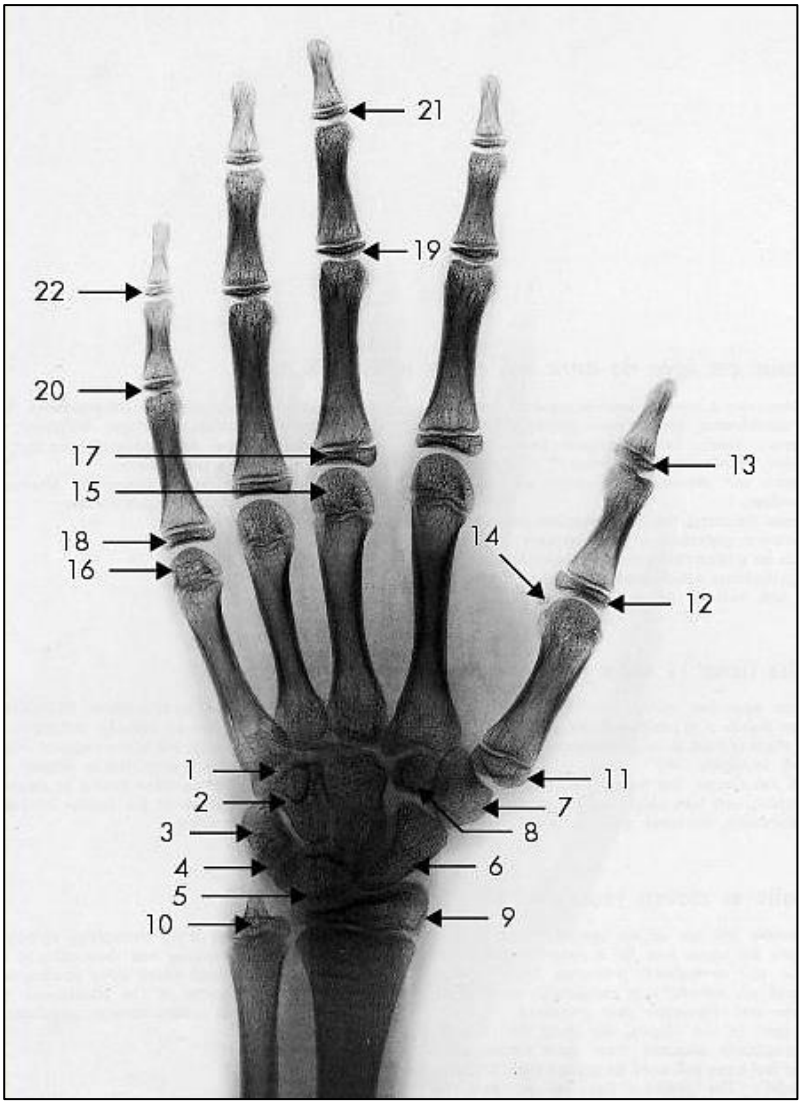


Figure 130 : Radiographie sur les 22 indicateurs de maturation concernés par la lecture de l'AO, chez Sempé [23]

B. Le logiciel Maturos® 4.0 CD Rom :

L'abord au quotidien des méthodes numériques a été largement simplifié par l'apport des outils informatiques qui ont permis l'automatisation de l'évaluation de la maturation osseuse [23, 24, 62].

La méthode de Sempé a été en avance, par son invention du « MATUROS », la version informatisée de la méthode numérique de Sempé, qui est un logiciel automatisé d'analyse de l'AO fondé sur les travaux du Professeur Sempé, et qui a été élaboré par le Professeur SEMPE Michel, le Docteur BOUCHARD Maryvonne et leurs collaborateurs [2, 81, 87, 121]. Ils ont édité « MATUROS 1.0 » en 1988, et le « MATUROS 4.0 CD » en 2001, était l'évolution dernière [24, 42].

Le « Maturos® » a pour objectif de proposer une approche précise, rapide, reproductible et facile de la maturation squelettique. Avec ce le logiciel, l'analyse de la maturation squelettique est plus aisée, elle procède comme pour l'analyse classique, en ci-dessus, d'une triple démarche [24, 134] :

- apparier les images radiographiques étudiées à celles de référence reproduites sur l'écran de « Maturos » ;
- mémoriser la similitude la plus plausible en utilisant la lettre-repère indiquée sur l'intervalle donné par « Maturos » ;
- saisir l'information ainsi décryptée par la simple addition qu'effectuera le logiciel « Maturos ».

a. L'acquisition du logiciel

Par une simple recherche sur internet, j'ai trouvé le site web du Groupe Français d'Auxologie (GFA), association fondée par le Professeur Sempé et présidée par son collaboratrice, l'endocrino-pédiatre Docteur Maryvonne BOUCHARD.

Le but c'était d'acheter le Logiciel MATUROS CD Rom.

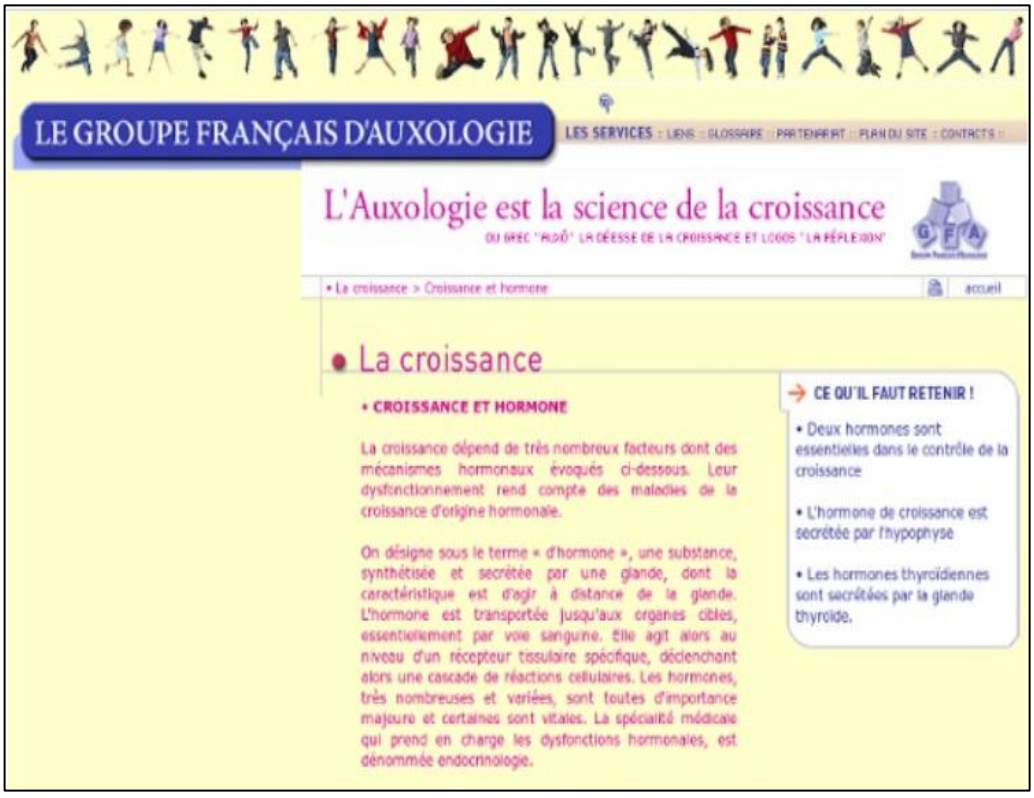


Figure 131 : Le site web du Groupe Français d'Auxologie

Après quelques procédures d'ordre administratif, notamment l'envoie du bon de commande, j'ai pu acquérir ce CD Rom, le 12 décembre 2011.

N.B. : Le site web du groupe GFA est retiré récemment de l'internet.



Groupe Français d'Auxologie

BON DE COMMANDE

Je soussigné, ...

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

.....

Tél : ..... Fax : .....

E-mail : .....

☐ Souhaite adhérer au Groupe Français d'Auxologie et verse ce jour ma cotisation : **20 euros TTC**

☐ Souhaite **utiliser régulièrement** les nouvelles courbes de croissance du Groupe Français d'Auxologie et verse ce jour une cotisation supplémentaire (facultatif) pour nous aider à continuer à développer notre site. Merci pour votre aide. Cotisation : **20 euros TTC**

☐ Souhaite recevoir « l'ATLAS d'Évaluation de la Maturation Squelettique du Dr. Michel Sempé ». au prix de **100 euros TTC.**

☐ Souhaite recevoir le logiciel MATUROS 4.0 CD Rom (version PC uniquement) au prix de **45 euros TTC.**

Ci joint mon règlement par : ☐ chèque bancaire ☐ postal ☐ mandat lettre

Signature (Merci de garder une copie de ce bulletin à titre de reçu.):

Bon de commande **à renvoyer à :**

Groupe Français d'Auxologie • Clinique du Val D'Ouest • 39 chemin de la VERNIQUE • 69130 ECULLY • FRANCE

Association Loi du 1er Juillet 1901 du 25 Mai 2000 - N° 069104555

Figure 132 : Le Bon de Commande pour achat du Logiciel Maturos® CD Rom

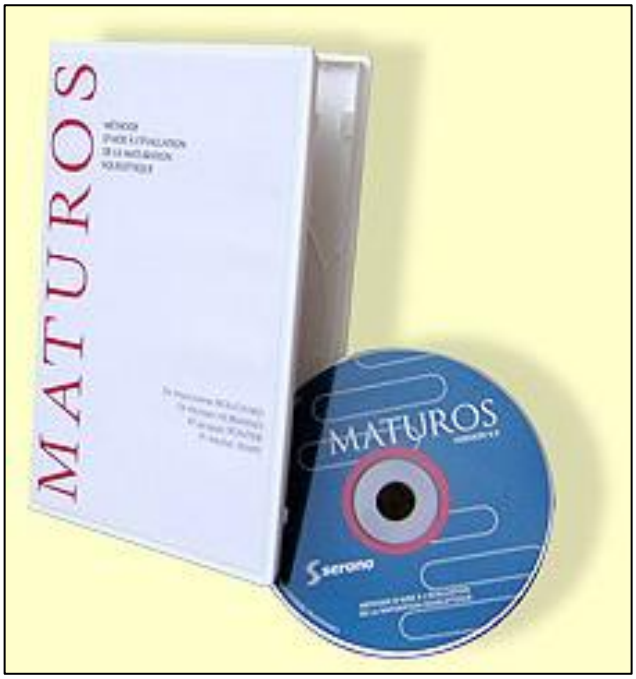


Figure 133 : Le Logiciel Maturos® CD Rom acquis

b. <u>La présentation du « Pack » Logiciel Maturos® 4.0 CD Rom</u>

Le logiciel Maturos® CD Rom qui m'a été envoyé, se présente sous forme d'un « pack », c'est-à-dire un lot d'objets dans un même boitier, qui comporte les « pièces » suivantes :

- Un boitier, sur lequel sont mentionnés : le Titre, les Collaborateurs et le Laboratoire reproducteur ;
- Le CD Rom « Maturos », version 4.0 ;
- Un dépliant titré : MATUROS « Mode d'emploi, Version PC » ;
- Un livret de 16 pages, présentant un résumé titré : MATUROS « Méthode d'aide à l'évaluation de la maturation squelettique » ;
- Enfin, six (6) clichés radiographiques, titrés : exemple 1, exemple 2,… exemple 6. Ce sont des exemples de clichés à des stades de maturation squelettique différents, qui seront utilisés dans la rubrique « Simulation » du Logiciel.

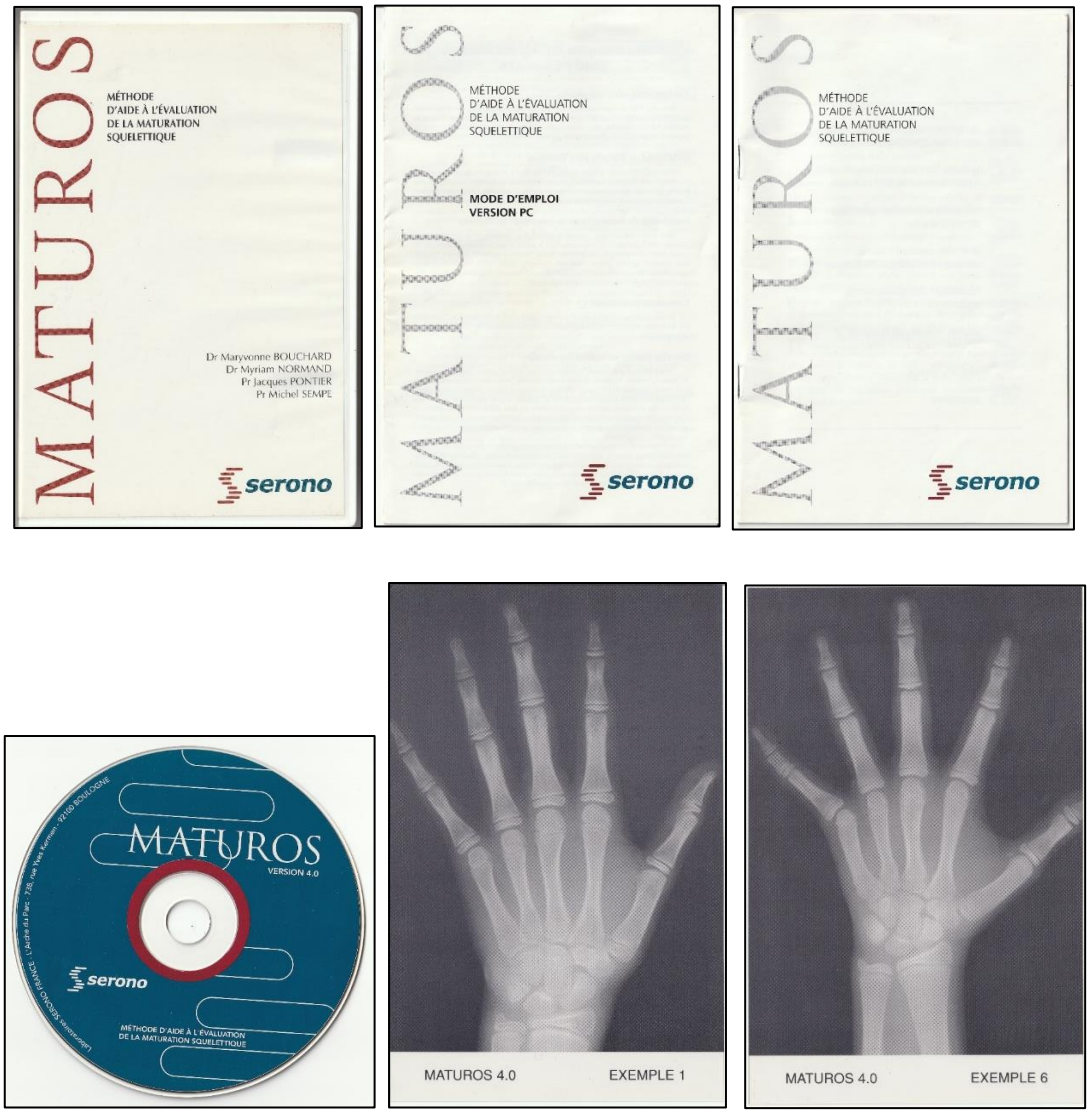


Figure 134 : Le pack MATUROS (boitier, CD Rom, dépliant mode d'emploi, livret méthode de Sempé, six clichés radiographiques)

C. Le mode d'utilisation du Logiciel Maturos® 4.0 :

Le Maturos®, dans sa version 4.0, est sous forme d'un CD-Rom qui nécessite des conditions techniques pour sa configuration sur PC : processus, mémoire vive, carte graphique, lecteur CD, espace disque, système d'exploitation, résolution écran, etc…

De telles conditions sont mentionnées dans le dépliant « mode d'emploi ».

Par conséquent, le Logiciel est prêt à être installé.



Figure 135 : Le lancement de Maturos

a. <u>Présentation du logiciel</u>

Après installation du Maturos, on procède à son lancement en double cliquant sur l'icône Maturos situé dans le bureau Windows.

La page d'accueil du Maturos qui apparait ainsi (Fig. 136), est une page bleue avec quelques rubriques à exploiter :

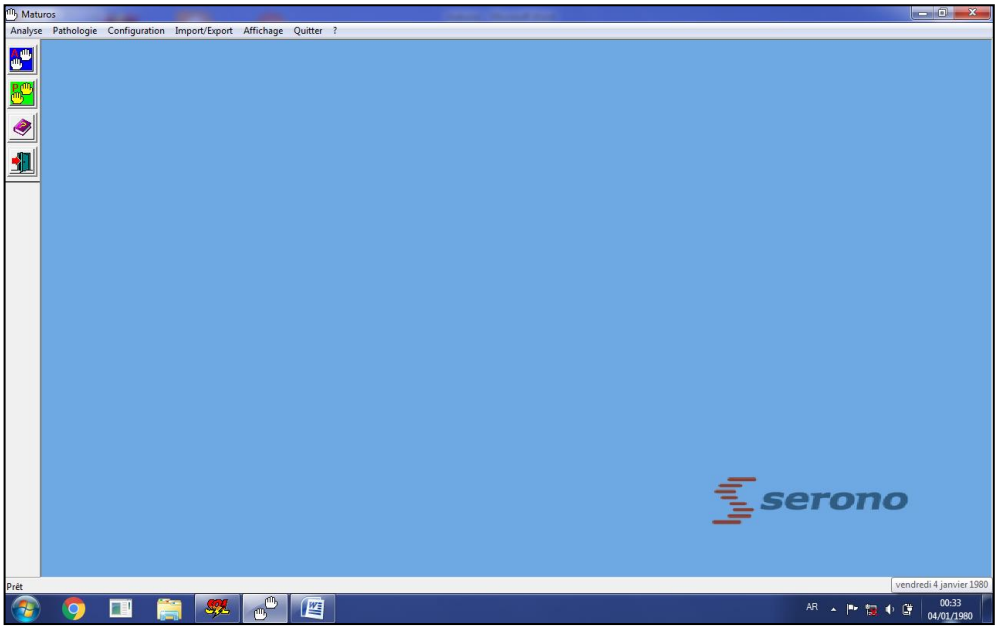


Figure 136 : Ecran Maturos 4.0 - La page d'accueil

- **Analyse** : lance la lecture des clichés radiographiques, avec une aide à la « Simulation », sorte de procédure d'apprentissage (sur les 6 clichés du Pack Maturos) ;
- **Pathologie** : rubrique « d'aide au diagnostic », avec représentation de trois exemples ;
- **Configuration** ;
- **Import/Export** ;
- **Affichage** ;
- **Quitter** ;
- **?** (à propos du Maturos)

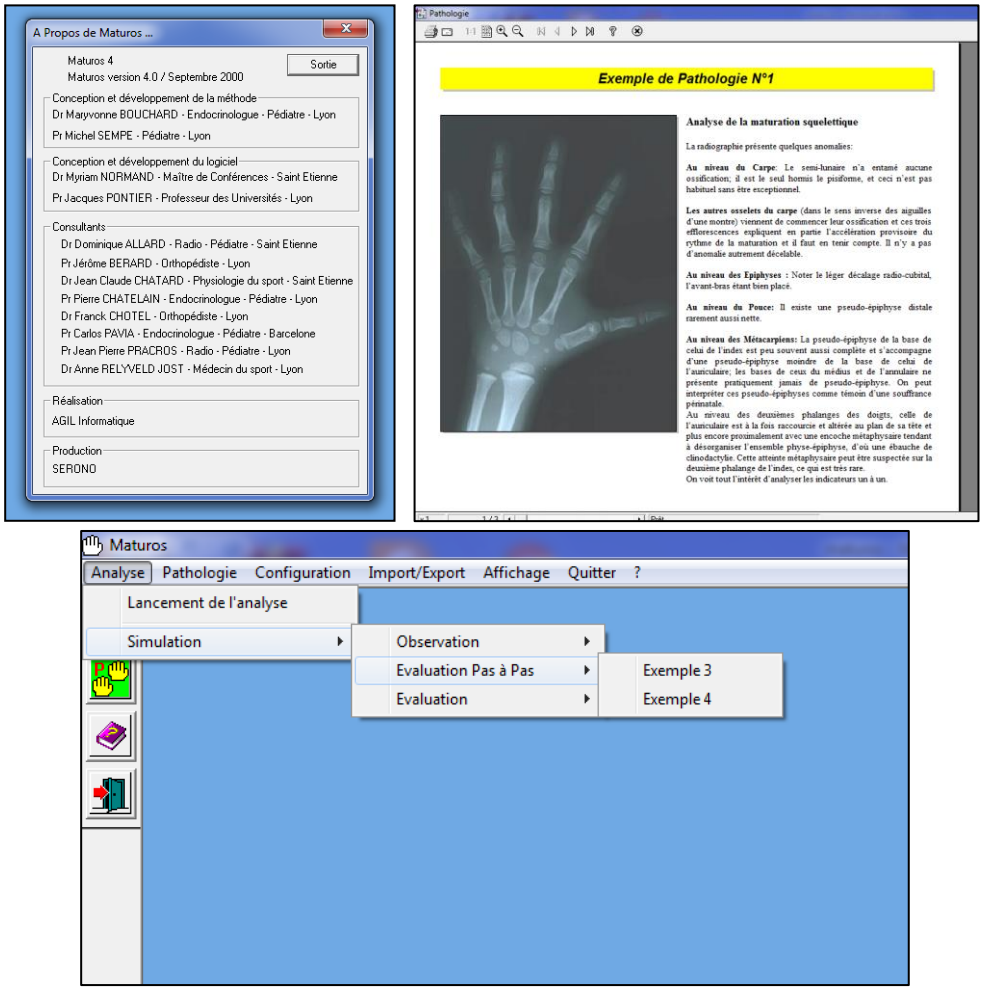


Figure 137 : Ecran Maturos 4.0 - Quelques rubriques

b. Le calcul de l'âge osseux

On commence par lancer l'analyse de la radiographie : sur la fenêtre d'accueil de Maturos, on clique sur « Analyse » (ou sur le bouton contenant la lettre A).

On reçoit la première fenêtre, titrée : « Recherche Patient/Analyse », pour rechercher dans l'archive le dossier d'un patient (F3) ou pour lancer une nouvelle analyse (F6). Cette fenêtre comporte des informations générales.

- <u>Informations générales :</u>

  Elles comportent trois parties :

  - Identification du patient : Nom, Prénom, Sexe, Date de naissance, Date de la radiographie à analyser, Numéro du dossier ;
  - Sélection de l'examinateur ;
  - Caractérisation de l'analyse : complète ou réduite. Ce sont deux méthodes d'analyse de la radiographie proposées, (a) la méthode complète (classique) utilisant les 22 indicateurs et (b) une méthode réduite (simplifiée) sur les 10 les plus représentatifs en fonction de l'âge chronologique.

  Quand on termine d'introduire toutes les informations, on doit cliquer sur « Enregistrer Patient (F2) »

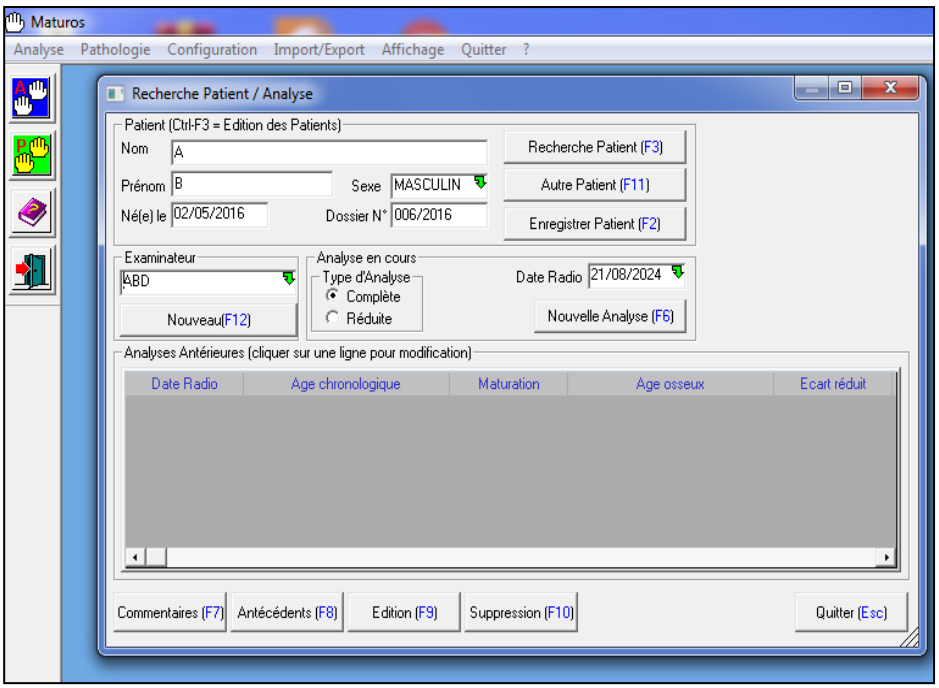


Figure 138 : Ecran Maturos 4.0 - La saisie des informations

- <u>Lecture des indicateurs osseux :</u>

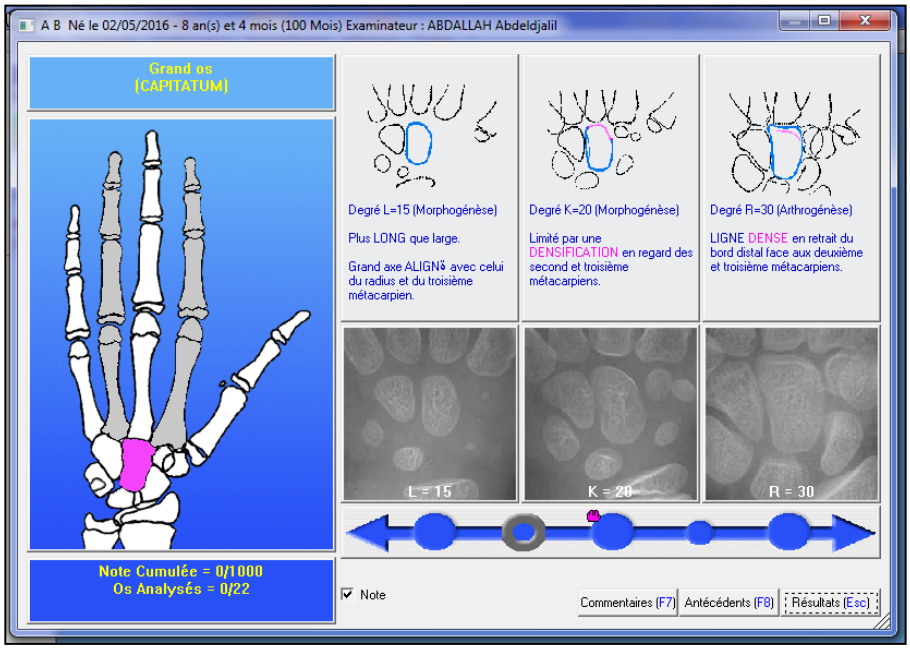
  Quand on clique sur « Nouvelle Analyse (F6) », on reçoit une fenêtre consacrée à la lecture et à la cotation des « indicateurs osseux ».

  Cette fenêtre d'analyse comporte 4 zones : (1) le schéma du squelette de la main gauche, (2) les « mini » radiographies des étapes de maturation d'un os, (3) les schémas des étapes de maturation d'un os annotés par des descriptions précises et (4) la barre de navigation.

  La lecture et la cotation des « indicateurs osseux » se font comme suit :

  - Le logiciel défile les indicateurs, un par un, jusqu'à la fin de l'analyse ;

- Selon l'ordre décrit plus haut, en commençant par le Capitatum (indicateur 1) et en terminant par l'épiphyse proximale de la 3ème phalange de l'auriculaire (indicateur 22) ;
- Pour chaque indicateur osseux, le logiciel propose des « mini » radiographies et des schémas de référence à comparer à la radiographie à analyser afin de déterminer le stade maturatif de l'indicateur osseux étudié ;



- **Figure 139 : Ecran Maturos 4.0 - analyse du capitatum (premier indicateur). Schémas et mini radios proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture**

- Pour faciliter la décision concernant le stade maturatif, qui doit être la plus précise possible, le logiciel propose, en fonction de l'AC de l'enfant, les 3 degrés maturatifs les plus probables, chacun sous les formes déjà décrites (schéma descriptif, texte explicatif et « mini » radiographie) ;
- On peut faire apparaitre les degrés voisins s'ils semblent plus appropriés, en défilant la barre de navigation à l'aide de la souris ou des flèches du clavier. Le médecin détermine alors le degré maturatif adéquat, en comparant la radio de l'enfant aux images de références données par le logiciel ;
- Pendant la lecture, tous les aspects rencontrés sur la radiographie à examiner se superposent aux images de référence désignées par une lettre ou semblent se situer entre deux de ces images : l'examinateur « clique » alors le degré retenu sur la bande de déroulement (barre de navigation). Ce degré maturatif, codé par une lettre (O, Q, P, N, M, L, K, R, S, T,) correspond à une note qui

est alors enregistrée par le logiciel pour permettre le calcul du pourcentage de maturation squelettique ;

- Cette procédure est ensuite répétée dans l'ordre requis par le logiciel, pour chacun des 22 indicateurs sélectionnés dans l'analyse.

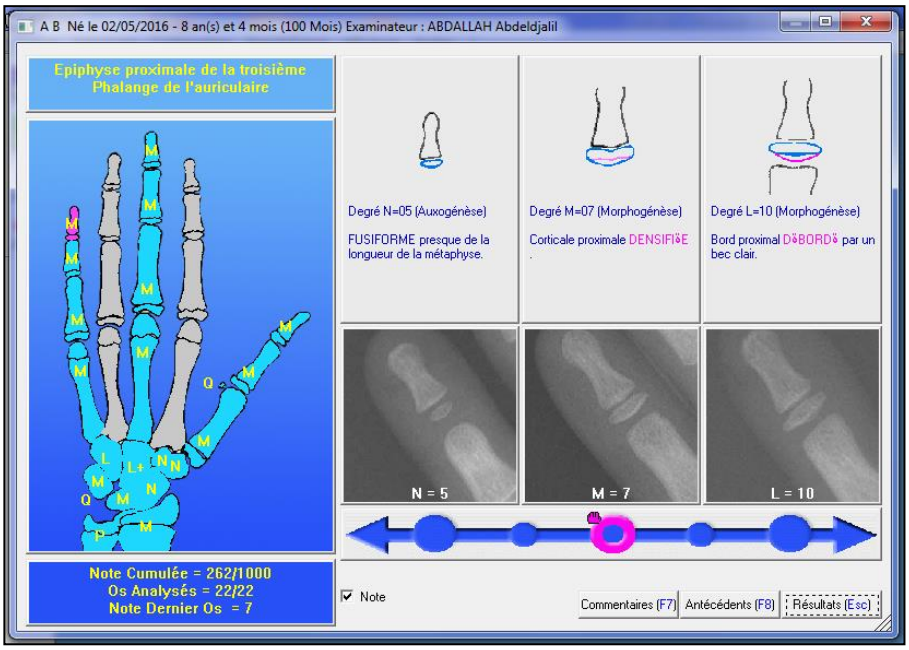


Figure 140 : Ecran Maturos 4.0 - analyse de l'épiphyse proximale de la 3ème phalange de l'auriculaire (dernier indicateur).Schémas et mini radios proposés en fonction de l'âge de l'enfant pour une aide à la lecture

- <u>Résultats :</u>

  Une fois les 22 indicateurs analysés, le logiciel intègre automatiquement les notes enregistrées pour chaque degré et effectue les calculs qui permettent d'obtenir (1) le pourcentage de maturation squelettique, allant de 0 % à la naissance à 100 % à l'âge adulte, de convertir ce taux en (2) « équivalent âge osseux », et de dessiner (3) la courbe de maturation squelettique.

  Tout ça est obtenu en cliquant sur le bouton « Résultats (Esc) ».

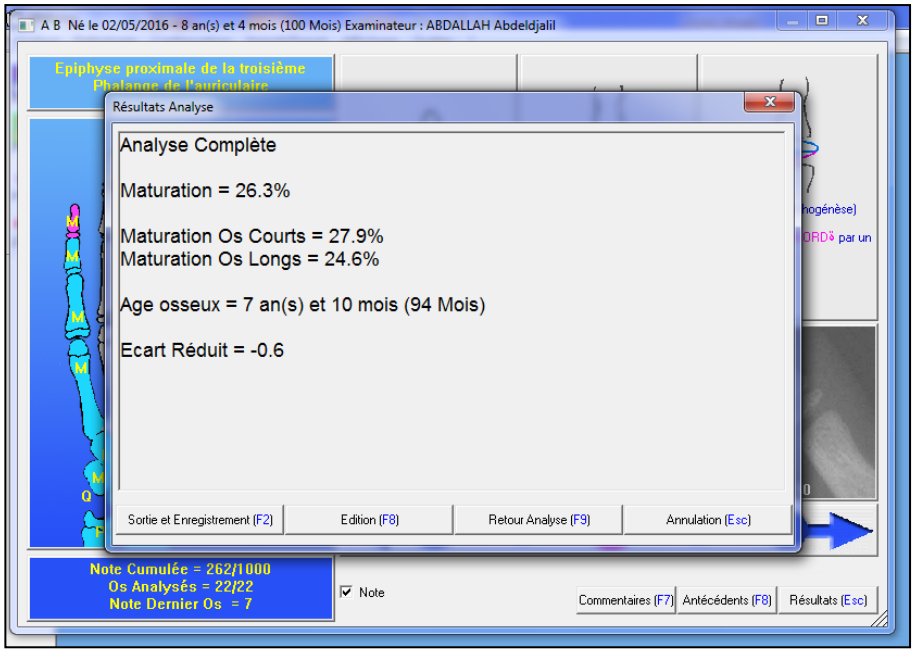


Figure 141 : Ecran Maturos 4.0 - Les résultats de l'analyse de la maturation squelettique

Les résultats de l'évaluation de la maturation squelettique, en plus, sont imprimables. Le logiciel fournit deux comptes rendus sur un fond blanc (Fig. 142-143, et voir aussi dans : ANNEXES) :

- Le compte rendu de maturation squelettique n° 1 : sur lequel sont mentionnés le pourcentage de maturation, l'équivalent en AO et le graphe correspondant c.-à-d. la courbe de maturation osseuse, avec l'écart-type +/- 2 σ, qui permet de mieux repérer la situation de l'enfant par rapport à la moyenne pour l'âge ; Lorsque plusieurs évaluations sont faites chez un même enfant, la mémoire des examens précédents permet un suivi longitudinal.
- Le compte rendu de maturation squelettique n° 2 : c'est un relevé détaillé des stades maturatifs des indicateurs osseux.

MATUROS 4.0 / 21-08-2024 11h20:20

B A né le 02/05/2016

RESULTATS de l'évaluation de la MATURATION SQUELETTIQUE

Date de la dernière radiographie : 21/08/2024

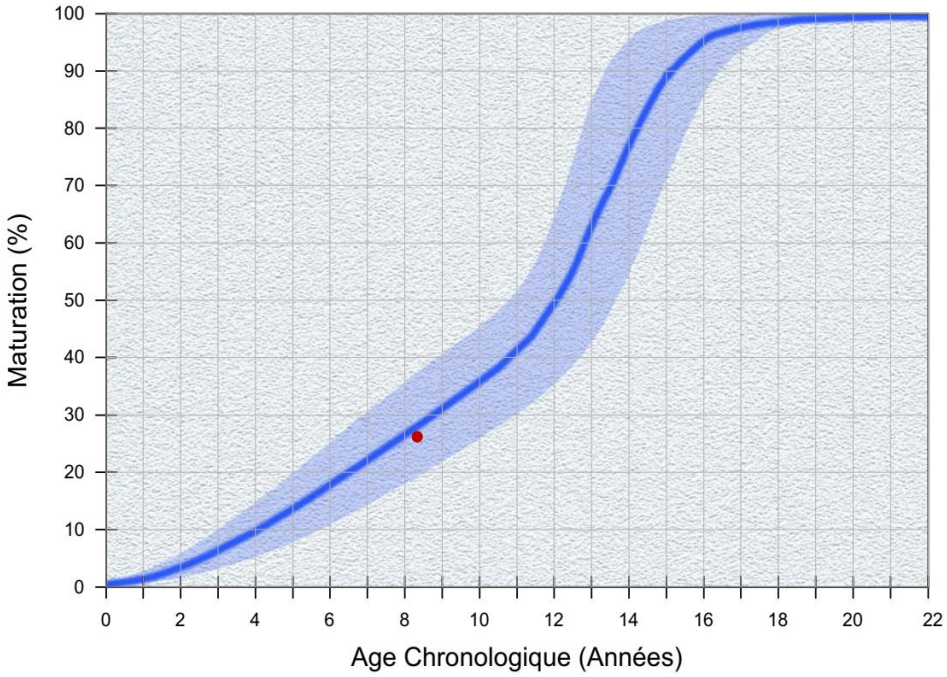
Age chronologique : 8 an(s) et 4 mois (100 Mois)

MATURATION SQUELETTIQUE :
26.3%

Equivalent "âge osseux"
7 an(s) et 10 mois (94 Mois)

Maturation Os courts : 27.9%
Maturation Os longs : 24.6%
Ecart Réduit :-0.6

Situation par rapport à la moyenne ± 2 écart types



Antécédents :

Commentaires :

Figure 142 : Le compte rendu de maturation squelettique n° 1, fourni par Maturos

MATUROS 4.0 / 21-08-2024 11h22:00

MATURATION SQUELETTIQUE

B A né le 02/05/2016

Examen n°1

Examinateur ABDALLAH Abdeldjalil (Analyse Complète)
Date de la radiographie : 21/08/2024
Age chronologique : 8 an(s) et 4 mois (100 Mois)
Maturation Squelettique : 26.3%
Age squelettique :7 an(s) et 10 mois (94 Mois)
Maturation Os courts : 27.9%
Maturation Os longs : 24.6%
Ecart Réduit :-0.6

Nom	Lettre	Note
Grand os	L+	17.5
Os crochu	L	20
Pyramidal	M	20
Pisiforme	Q	2
Semi lunaire	M	20
Scaphoide	N	20
Trapèze	N	20
Trapèzoide	N	20
Note Os courts		**139**
Epiphyse distale du Radius	M	20
Epihyse distale du Cubitus	P	15
Epiphyse proximale du premier métacarpien	M	10
Epiphyse proximale de la première phalange du pouce	M	10
Premier Sésamoide du pouce	Q	2
Epiphyse proximale de la seconde phalange du pouce	M	10
Epiphyse distale du troisième métacarpien	M	7
Epiphyse distale du Cinquième métacarpien	M	7
Epiphyse proximale de la première phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la première phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la seconde phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la seconde phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la troisième phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la troisième Phalange de l'auriculaire	M	7
Note Os longs		**123**
Note Totale		**262**

Figure 143 : Le compte rendu de maturation squelettique, n° 2, fourni par Maturos

Remarque importante :

D'un côté pratique, et pour plus d'exactitude de la lecture du cliché radiographique, nous devons mentionner l'intérêt d'utiliser une **loupe** pour voir le détail quelquefois fin du cliché, pas seulement pour l'image de la première apparition encore flou du point d'ossification, mais aussi pour les indicateurs osseux des phalanges (épiphyses proximales).

Nous avons utilisé, pour cela, la loupe « Deli », présentant quelques caractéristiques :

- Loupe à double lentille ;
- Lentille principale en verre ;
- Objectif de 55 mm de diamètre ;
- Référence 9091 ;
- Grossissement : grand verre : 3,0 x, petite loupe : 6 x ;
- Couleur Noir.



Figure 144 : Loupe « Deli » à double lentille

D. Les âges osseux de la population d'étude, calculés par Maturos® 4.0 :

Selon les étapes opérationnelles, citées en ci-dessus, nous avons effectués l'analyse des clichés radiographiques de chaque enfant et adolescent de l'échantillon, afin de déterminer le taux de maturation squelettique, en pourcentage, et l'AO correspondant, en année et mois.

En ci-après, la totalité de l'échantillon avec, pour chaque enfant et adolescent, son taux de maturation squelettique et l'AO correspondant.

Tableau 44 : La population recrutée (2)

Le taux de maturation squelettique et l'AO correspondant (D'après : Logiciel Maturos® 4.0)

N°	N° Dossier	Nom et Prénom	Sexe (M/F)	Date de naissance (jj/mm/aaaa)	Age civil (AC) (années, mois)	Taux de maturation squelettique (en %)	Age osseux (AO) (années, mois)
01	001/2012	B. Oussama	M	18/12/2008	4 ans (48 mois)	13,1	4 ans, 10 mois (58 mois)
02	002/2013	A. Rahaf	F	08/04/2005	8 ans, 8 mois (104 mois)	36,9	9 ans (108 mois)
03	003/2013	A. Ranim	F	06/12/2005	8 ans (96 mois)	34,6	8 ans, 7 mois (103 mois)
04	004/2013	A. Taha	M	21/08/2011	2 ans, 3 mois (27 mois)	6	2 ans, 10 mois (34 mois)
05	005/2013	S. Mosaab	M	12/11/2006	7 ans, 1 mois (85 mois)	20,8	6 ans, 7 mois (79 mois)
06	006/2013	S. Tesnim	F	31/01/2010	3 ans, 10 mois (46 mois)	18,6	5 ans, 1 mois (61 mois)
07	007/2013	K. Malek	F	05/11/2009	4 ans, 1 mois (49 mois)	16,2	4 ans, 6 mois (54 mois)
08	008/2013	K. Amani Naouara	F	05/11/2005	8 ans, 1 mois (97 mois)	35,1	8 ans, 8 mois (104 mois)
09	009/2013	K. Ouassim	M	10/04/2010	3 ans, 8 mois (44 mois)	8,3	3 ans, 6 mois (42 mois)
10	010/2013	A. Rafif	F	09/11/2012	1 an, 1 mois (13 mois)	1,5	5 mois
11	011/2013	R. Djoumana	F	30/09/2012	1 an, 3 mois (15 mois)	2,2	9 mois
12	012/2014	A. Amine Arrehmane	M	15/01/2009	5 ans (60 mois)	10,5	4 ans, 2 mois (50 mois)
13	013/2014	B. Alae	F	10/01/2013	1 an (12 mois)	3	1 an (12 mois)
14	014/2014	B. Ibrahim Anes	M	21/04/2011	2 ans, 9 mois (33 mois)	4	2 ans, 1 mois (25 mois)
15	015/2014	K. Abdelmoumen	M	21/09/2008	5 ans, 4 mois (64 mois)	12,7	4 ans, 9 mois (57 mois)
16	016/2014	K. Imen	F	23/01/2005	9 ans (108 mois)	36,6	8 ans, 11 mois (107 mois)
17	017/2014	K. Amina	F	27/06/2003	10 ans, 7 mois (127 mois)	57	11 ans, 1 mois (133 mois)
18	018/2014	D. Halima	F	30/04/2010	3 ans, 9 mois (45 mois)	11,7	3 ans, 6 mois (42 mois)
19	019/2014	D. Aroua	F	12/04/2013	10 mois	0,9	2 mois
20	020/2014	D. Razane	F	24/06/2013	7 mois	1,6	5 mois
21	021/2014	D. Mohamed Chahid	M	03/01/2012	2 ans, 1 mois (25 mois)	5,6	1 an, 11 mois (23 mois)
22	022/2014	D. Tasbih Alabrar	F	02/04/2008	5 ans, 10 mois (70 mois)	25,9	6 ans, 8 mois (80 mois)
23	023/2014	D. Raed Salah	M	05/08/2011	2 ans, 6 mois (30 mois)	7,5	3 ans, 3 mois (39 mois)
24	024/2014	L. Fatima	F	08/06/2011	2 ans, 8 mois (32 mois)	10,6	3 ans, 3 mois (39 mois)
25	025/2014	L. Amine	M	21/02/2001	13 ans (156 mois)	65,2	13 ans, 2 mois (158 mois)
26	026/2014	B. Raihane	F	27/03/2005	8 ans, 11 mois (107 mois)	37,3	9 ans, 1 mois (109 mois)
27	027/2014	B. Ghofrane	F	08/07/2003	10 ans, 8 mois (128 mois)	45,2	10 ans, 2 mois (122 mois)

28	028/2014	B. Selmane	M	27/09/2009	4 ans, 5 mois (53 mois)	8,6	3 ans, 7 mois (43 mois)
29	029/2014	M. Mohamed Raouf	M	12/04/2007	6 ans, 11 mois (83 mois)	27,9	8 ans, 3 mois (99 mois)
30	030/2014	M. Chouaib	M	24/07/2000	13 ans, 8 mois (164 mois)	66,6	13 ans, 3 mois (159 mois)
31	031/2014	M. Nouaim	M	20/07/2004	9 ans, 8 mois (116 mois)	41,7	11 ans (132 mois)
32	032/2014	B. Ayoub	M	13/10/2008	5 ans, 5 mois (65 mois)	17,3	5 ans, 10 mois (70 mois)
33	033/2014	B. Insaf	F	20/12/2011	2 ans, 3 mois (27 mois)	8,1	2 ans, 7 mois (31 mois)
34	034/2014	R. Khaled	M	04/01/2007	7 ans, 2 mois (86 mois)	20,4	6 ans, 6 mois (78 mois)
35	035/2014	O. Kaouter	F	21/11/2005	8 ans, 5 mois (101 mois)	35,5	8 ans, 9 mois (105 mois)
36	036/2014	O. Malek	F	18/09/2007	6 ans, 7 mois (79 mois)	32,1	8 ans, 1 mois (97 mois)
37	037/2014	G. Anes	M	11/12/2009	4 ans, 5 mois (53 mois)	12,9	4 ans, 9 mois (57 mois)
38	038/2014	G. Aroua	F	19/01/2012	2 ans, 3 mois (27 mois)	7,8	2 ans, 6 mois (30 mois)
39	039/2014	B. Abdelali	M	16/01/2004	10 ans, 3 mois (123 mois)	34,8	9 ans, 8 mois (116 mois)
40	040/2014	B. Akram	M	07/05/2006	8 ans (96 mois)	28	8 ans, 3 mois (99 mois)
41	041/2014	B. Abir	F	08/06/2002	11 ans, 11 mois (143 mois)	51,7	10 ans, 9 mois (129 mois)
42	042/2014	B. Islam	M	30/05/2008	5 ans, 11 mois (71 mois)	22,8	7 ans, 1 mois (85 mois)
43	043/2014	B. Anes	M	09/11/2009	4 ans, 6 mois (54 mois)	17,4	5 ans, 10 mois (70 mois)
44	044/2014	B. Raed	M	06/09/2013	8 mois	1,5	11 mois
45	045/2014	H. Abderraouf	M	13/09/2013	8 mois	1,1	9 mois
46	046/2014	S. Malek	F	09/08/2004	10 ans, 1 mois (121 mois)	49,8	10 ans, 7 mois (127 mois)
47	047/2014	O Mohamed	M	16/06/2014	3 mois	0,3	0 mois
48	048/2014	O Ahmed	M	05/02/2007	7 ans, 7 mois (91 mois)	25	7 ans, 7 mois (91 mois)
49	049/2014	R. Jihène	F	09/04/2009	5 ans, 5 mois (65 mois)	21,1	5 ans, 8 mois (68 mois)
50	050/2014	M. Salsabil	F	04/06/2008	6 ans, 3 mois (75 mois)	27,3	7 ans (84 mois)
51	051/2014	A. Amor	M	22/08/2012	2 ans, 1 mois (25 mois)	2,6	1 an, 7 mois (19 mois)
52	052/2014	R. Mohamed	M	16/02/2013	1an, 7 mois (19 mois)	2,5	1 an, 6 mois (18 mois)
53	053/2014	S. Hiba	F	05/10/2010	3 ans, 11 mois (47 mois)	12,7	3 ans, 9 mois (45 mois)
54	054/2014	M. Fatma Zohra	F	01/09/2011	3 ans (36 mois)	7,8	2 ans, 6 mois (30 mois)
55	055/2014	B. Hadjer	F	29/09/2011	3 ans (36 mois)	13,8	4 ans (48 mois)
56	056/2014	S. Barae	M	31/01/2014	8 mois	1,6	1 an, 1 mois (13 mois)
57	057/2014	L. Rami	M	12/12/2006	7 ans, 10 mois (94 mois)	27,4	8 ans, 1 mois (97 mois)
58	058/2014	O. Fatma	F	19/03/2006	8 ans, 6 mois (102 mois)	34,1	8 ans, 6 mois (102 mois)
59	059/2014	O. Aicha	F	07/11/2009	4 ans, 11 mois (59 mois)	21,1	5 ans, 8 mois (68 mois)

60	060/2014	M. Ismahène	F	12/09/2012	2 ans, 1 mois (25 mois)	4	1 an, 5 mois (17 mois)
61	061/2014	H. Sofiane	M	08/07/2013	1 an, 3 mois (15 mois)	1,3	10 mois
62	062/2014	S. Abdelmalek	M	13/04/2013	1 an, 6 mois (18 mois)	3,7	2 ans (24 mois)
63	063/2014	L. Fedoua	F	05/05/2013	1 an, 5 mois (17 mois)	2,4	9 mois
64	064/2014	K. Nour Imene	F	20/11/2012	1 an, 11 mois (23 mois)	4,8	1 an, 8 mois (20 mois)
65	065/2014	B. Alaeddine	M	03/02/2005	9 ans, 8 mois (116 mois)	33,5	9 ans, 5 mois (113 mois)
66	066/2014	B. Lina Samar	F	26/08/2010	4 ans, 2 mois (50 mois)	11,4	3 ans, 5 mois (41 mois)
67	067/2014	B. Mourad	M	07/01/2006	8 ans, 9 mois (105 mois)	28,7	8 ans, 5 mois (101 mois)
68	068/2014	K. Mohcen	M	02/10/2013	1 an, 1 mois (13 mois)	1,1	9 mois
69	069/2014	B. Nour	F	10/11/2004	9 ans, 11 mois (119 mois)	42,6	9 ans, 10 mois (118 mois)
70	070/2014	B. Achraf	M	06/02/2014	9 mois	1,3	10 mois
71	071/2014	M. Rassim	M	17/09/2010	4 ans, 1 mois (49 mois)	9,7	3 ans, 11 mois (47 mois)
72	072/2014	O. Rawen	F	14/01/2011	3 ans, 10 mois (46 mois)	13,4	3 ans, 11 mois (47 mois)
73	073/2014	O. Ayoub	M	19/07/2012	2 ans, 4 mois (28 mois)	4,8	2 ans, 5 mois (29 mois)
74	074/2014	B. Mouad	M	30/11/2012	1 an, 11 mois (23 mois)	4,3	2 ans, 3 mois (27 mois)
75	075/2014	R. Islam	M	11/03/2006	8 ans, 8 mois (104 mois)	30,5	8 ans, 9 mois (105 mois)
76	076/2014	A. Moatez	M	29/10/2011	3 ans, 1 mois (37 mois)	6,2	2 ans, 11 mois (35 mois)
77	077/2014	T. Abderrahim	M	08/04/2010	4 ans, 7 mois (55 mois)	11,5	4 ans, 5 mois (53 mois)
78	078/2014	F. Roumaissa	F	12/11/2012	2 ans (24 mois)	3,3	1 an, 2 mois (14 mois)
79	079/2014	B. Serine	F	09/10/2013	1 an, 1 mois (13 mois)	2,3	9 mois
80	080/2014	Z. Ghania	F	10/06/2008	6 ans, 5 mois (77 mois)	29,9	7 ans, 7 mois (91 mois)
81	081/2014	T. Meriem	F	01/05/2007	7 ans, 7 mois (91 mois)	26,1	6 ans, 9 mois (81 mois)
82	082/2014	M. Houcine	M	14/02/2008	6 ans, 9 mois (81 mois)	22,4	7 ans (84 mois)
83	083/2014	B. Belkis	F	11/06/2012	2 ans, 5 mois (29 mois)	7,2	2 ans, 4 mois (28 mois)
84	084/2014	D. Iyed	M	04/12/2010	4 ans (48 mois)	7,0	3 ans, 2 mois (38 mois)
85	085/2014	B. Nourelhouda	F	10/10/2005	9 ans, 1 mois (109 mois)	40,3	9 ans, 6 mois (114 mois)
86	086/2014	D. Rahma	F	10/10/2013	1 an, 2 mois (14 mois)	2,9	1 an (12 mois)
87	087/2014	B. Nadjmeddine	M	14/12/2013	1 an (12 mois)	1,8	1 an, 1 mois (13 mois)
88	088/2014	B. Hadil	F	02/11/2010	4 ans, 1 mois (49 mois)	18,1	4 ans, 11 mois (59 mois)
89	089/2014	B. Nourelhouda	F	17/01/2006	8 ans, 11 mois (107 mois)	35,8	8 ans, 10 mois (106 mois)
90	090/2014	H. Mohamed	M	22/11/2006	8 ans (96 mois)	25,4	7 ans, 8 mois (92 mois)

91	091/2014	S. Soundous	F	18/12/2012	2 ans (24 mois)	4,9	1 an, 8 mois (20 mois)
92	092/2014	N. Mohamed Aymen	M	29/11/2013	1 an (12 mois)	2,3	1 an, 5 mois (17 mois)
93	093/2014	K. Rokaya	F	03/04/2003	11 ans, 9 mois (141 mois)	70,8	12 ans (144 mois)
94	094/2014	B. Ikram	F	03/12/2004	10 ans, 1 mois (121 mois)	37,4	9 ans, 1 mois (109 mois)
95	095/2014	B. Rihem	F	22/02/2013	1 an, 10 mois (22 mois)	5	1 an, 8 mois (20 mois)
96	096/2014	D. Lina	F	09/10/2004	10 ans, 3 mois (123 mois)	47,6	10 ans, 4 mois (124 mois)
97	097/2014	Z. Salsabil	F	11/11/2006	8 ans, 2 mois (98 mois)	33,7	8 ans, 5 mois (101 mois)
98	098/2014	G. Chaima	F	16/11/2009	5 ans, 1 mois (61 mois)	21,3	5 ans, 8 mois (68 mois)
99	099/2015	B. Fouad	M	11/06/2014	7 mois	0,7	5 mois
100	100/2015	B. Adam	M	01/10/2013	1 an, 3 mois (15 mois)	1,8	1 an, 2 mois (14 mois)
101	101/2015	D. Majid	M	01/02/2008	6 ans, 11 mois (83 mois)	24,6	7 ans, 6 mois (90 mois)
102	102/2015	H. Olfa	F	25/12/2005	9 ans, 1 mois (109 mois)	35,8	8 ans, 9 mois (105 mois)
103	103/2015	H. Zaineb	F	26/06/2007	7 ans, 11 mois (95 mois)	34	8 ans, 5 mois (101 mois)
104	104/2015	A. Ayad	M	30/12/2012	2 ans, 1 mois (25 mois)	4,6	2 ans, 4 mois (28 mois)
105	105/2015	B. Malissa	F	09/05/2014	9 mois	3,4	1 an, 2 mois (14 mois)
106	106/2015	C. Abdeldjalil	M	06/06/2009	5 ans, 11 mois (71 mois)	13,7	4 ans, 11 mois (59 mois)
107	107/2015	A. Khireddine	M	02/11/2004	10 ans, 7 mois (127 mois)	36	10 ans (120 mois)
108	108/2015	A. Bouthaina	F	16/04/2001	14 ans, 1 mois (169 mois)	81,3	12 ans, 9 mois (153 mois)
109	109/2015	M. Mohamed	M	27/06/2012	2 ans, 11 mois (35 mois)	5,2	2 ans, 7 mois (31 mois)
110	110/2015	M. Karima	F	06/11/2003	11 ans, 6 mois (138 mois)	66	11 ans, 8 mois (140 mois)
111	111/2015	B. Oussama	M	09/04/2009	6 ans, 1 mois (73 mois)	22,2	6 ans, 11 mois (83 mois)
112	112/2015	F. Nesrine	F	13/12/2011	3 ans, 6 mois (42 mois)	16,5	4 ans, 7 mois (55 mois)
113	113/2015	T. Anis	M	10/02/2003	12 ans, 4 mois (148 mois)	50,1	12 ans, 1 mois (145 mois)
114	114/2015	S. Mohamed Zine	M	11/08/2004	10 ans, 10 mois (130 mois)	48,9	11 ans, 11 mois (143 mois)
115	115/2015	L. Abdelmoumen	M	02/06/2014	1 an (12 mois)	0,8	6 mois
116	116/2015	B. Souha	F	05/04/2007	8 ans, 2 mois (98 mois)	35,8	8 ans, 10 mois (106 mois)
117	117/2015	C. Khalil	M	27/05/2010	5 ans, 1 mois (61 mois)	16	5 ans, 6 mois (66 mois)
118	118/2015	M. Soumaia	F	20/06/2008	7 ans (84 mois)	24,9	6 ans, 6 mois (78 mois)
119	119/2015	B. Abdelmouaz	M	03/01/2013	2 ans, 6 mois (30 mois)	7,2	2 ans, 3 mois (39 mois)
120	120/2023	C. Abdelmoumen	M	25/05/2007	16 ans, 1 mois (193 mois)	95,8	16 ans, 1 mois (193 mois)
121	121/2023	A. Taha	M	21/08/2011	11 ans, 11 mois (143 mois)	61,9	12 ans, 11 mois (155 mois)

122	122/2023	A. Ranim	F	06/05/2007	16 ans, 6 mois (198 mois)	98	15 ans, 3 mois (183 mois)
123	123/2023	A. Rafif	F	09/11/2012	11 ans (132 mois)	70	11 ans, 11 mois (143 mois)
124	124/2024	K. abdelmoumen	M	21/10/2008	15 ans, 11 mois (191 mois)	90,5	15 ans, 1 mois (181 mois)
125	125/2024	A. Rouae	F	29/04/2024	5 mois	1,6	6 mois
126	126/2024	G. Anes	M	11/12/2009	14 ans, 9 mois (177 mois)	83,3	14 ans, 5 mois (173 mois)
127	127/2024	G. Aroua	F	19/01/2012	12 ans, 8 mois (152 mois)	79,5	12 ans, 7 mois (151 mois)
128	128/2024	B. Raed	M	01/09/2013	11 ans, 1 mois (133 mois)	41,3	10 ans, 11 mois (131 mois)
129	129/2024	B. Islem	M	30/05/2008	16 ans, 4 mois (196 mois)	95,8	16 ans, 1 mois (193 mois)
130	130/2024	B. Anes	M	09/11/2009	14 ans, 10 mois (178 mois)	88,5	14 ans, 11 mois (179 mois)
131	131/2024	B. Ibrahim	M	21/04/2011	13 ans, 5 mois (161 mois)	71	13 ans, 7 mois (163 mois)
132	132/2024	B. Alae	F	10/01/2013	11 ans, 8 mois (140 mois)	68,3	11 ans, 10 mois (142 mois)
133	133/2024	R. Zayneb	F	11/05/2011	13 ans, 5 mois (161 mois)	86,8	13 ans, 2 mois (158 mois)
134	134/2024	A. Amine	M	15/01/2009	15 ans, 9 mois (189 mois)	83,2	14 ans, 5 mois (173 mois)
135	135/2024	K. Sirine	F	03/03/2009	15 ans, 8 mois (188 mois)	94,8	14 ans, 4 mois (172 mois)
136	136/2024	H. Yasmine	F	02/04/2009	15 ans, 7 mois (187 mois)	96,3	14 ans, 8 mois (176 mois)
137	137/2024	O. Hibat Arrehmane	F	09/01/2011	13 ans, 9 mois (165 mois)	85,0	13 ans, 0 mois (156 mois)
138	138/2024	F. Alae	F	06/12/2007	16 ans, 11 mois (203 mois)	98,5	15 ans, 7 mois (187 mois)

(4) LES MESURES ANTHROPOMÉTRIQUES

Les données anthropométriques, dites aussi biométriques, d'un individu reflètent en partie son âge biologique. Elles sont déterminées par des mesures dites anthropométriques, qui sont des paramètres cliniques utilisés pour évaluer la croissance chez les enfants et les adolescents et qui se rapportent toujours à l'âge et au sexe [21, 49, 127]. Néanmoins, plusieurs constatations confirment que ces paramètres cliniques doivent être rapportés non pas à l'AC, mais à l'état de maturation squelettique, étroitement corrélée avec la croissance. En effet, l'évaluation du développement d'un enfant ou d'un adolescent nécessite d'intégrer l'AO dans un contexte clinique plus large comme l'analyse des critères anthropométriques [4, 53-55].

Les mesures anthropométriques qui figurent dans cette étude sont le poids, la taille et l'indice de masse corporelle ; plusieurs courbes anthropométriques utilisées dans le quotidien médical, permettent, en fonction de l'AC de l'enfant, de suivre la croissance des individus.

A. La taille et le poids :

La taille et le poids sont deux paramètres de croissance plus connus et couramment évalués et utilisés, leur mesure est plus facile en utilisant des outils simples et anodins.

a. <u>La fiche des renseignements, « Deuxième partie »</u>

Sur la « Fiche de renseignements », déjà citée plus haut, figure la deuxième partie réservée au « Questionnaire », sur lequel sont mentionnées des informations à collecter : sur les mesures anthropométriques (Fig. 145) et sur le SSE (voir plus bas).

Les mesures anthropométriques de l'enfant ou de l'adolescent recruté pour cette étude, le « Poids » et la « Taille », sont mentionnées sur cet encadré.

Poids (en kg) **:** .....

Taille (en cm) **:** .....

Figure 145 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements »

b. <u>La taille</u>

La taille des enfants et des adolescents recrutés par nous-même a été mesurée à mon domicile, en utilisant une « toise déroulable murale » de marque « 3H ». C'est une toise qui pour l'utiliser, doit être fixée sur le mur.

Elle présente quelques caractéristiques :

- Longueur : 2 mètres ;
- Graduation : 1 millimètres ;

- Lecture directe dans la fenêtre d'observation ;
- Dimensions : 135 x 105 x 35 mm.

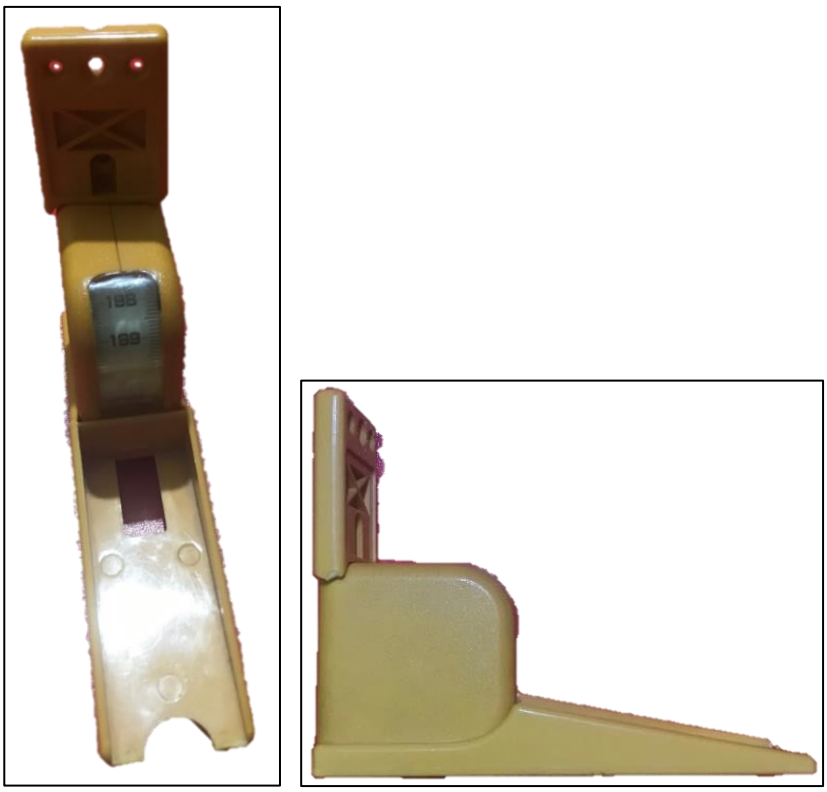


Figure 146 : toise déroulable murale

Pour les enfants et les adolescents recrutés dans l'hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse », leur taille a été mesurée dans la « salle de consultation », par le Docteur BOUHOUCHE, en utilisant une « toise murale ».
Les valeurs de la taille sont exprimées en **Centimètre** (**cm**).
L'évaluation passagère de l'état statural des enfants et des adolescents de la population, en utilisant les « Courbes Staturales », montre une harmonie générale dans leur développement par rapport à l'âge et au sexe.
La « Courbe Staturale » en référence utilisée pour cette évaluation, pour les filles et les garçons de 0 à 22 ans, est celle de Sempé et al. (Fig. 147-148, et voir aussi dans : ANNEXES)

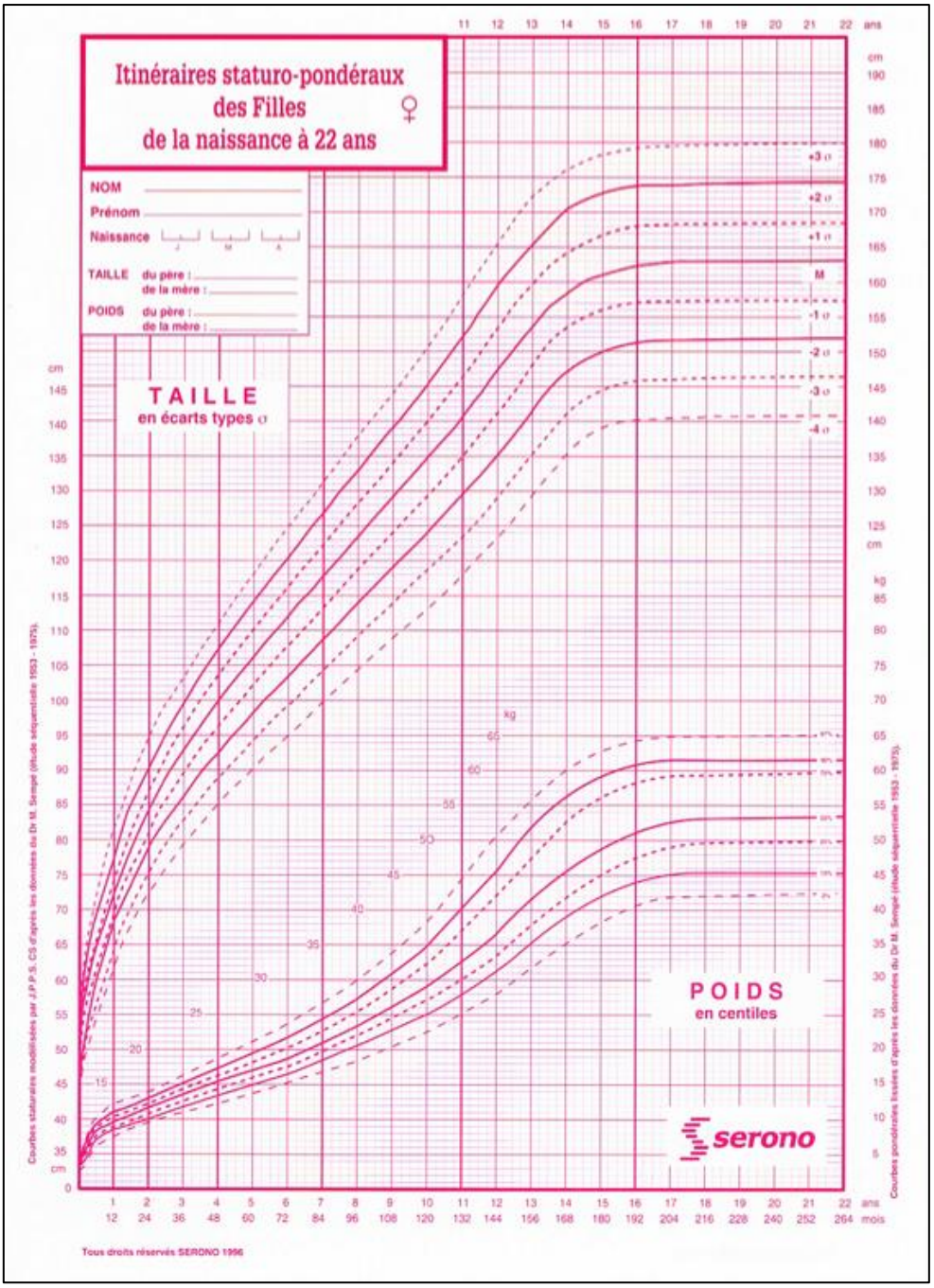


Figure 147 : Les Courbes Staturo-pondérales, filles, modélisés.
D'après les données du Pr Sempé (Réf : [137])

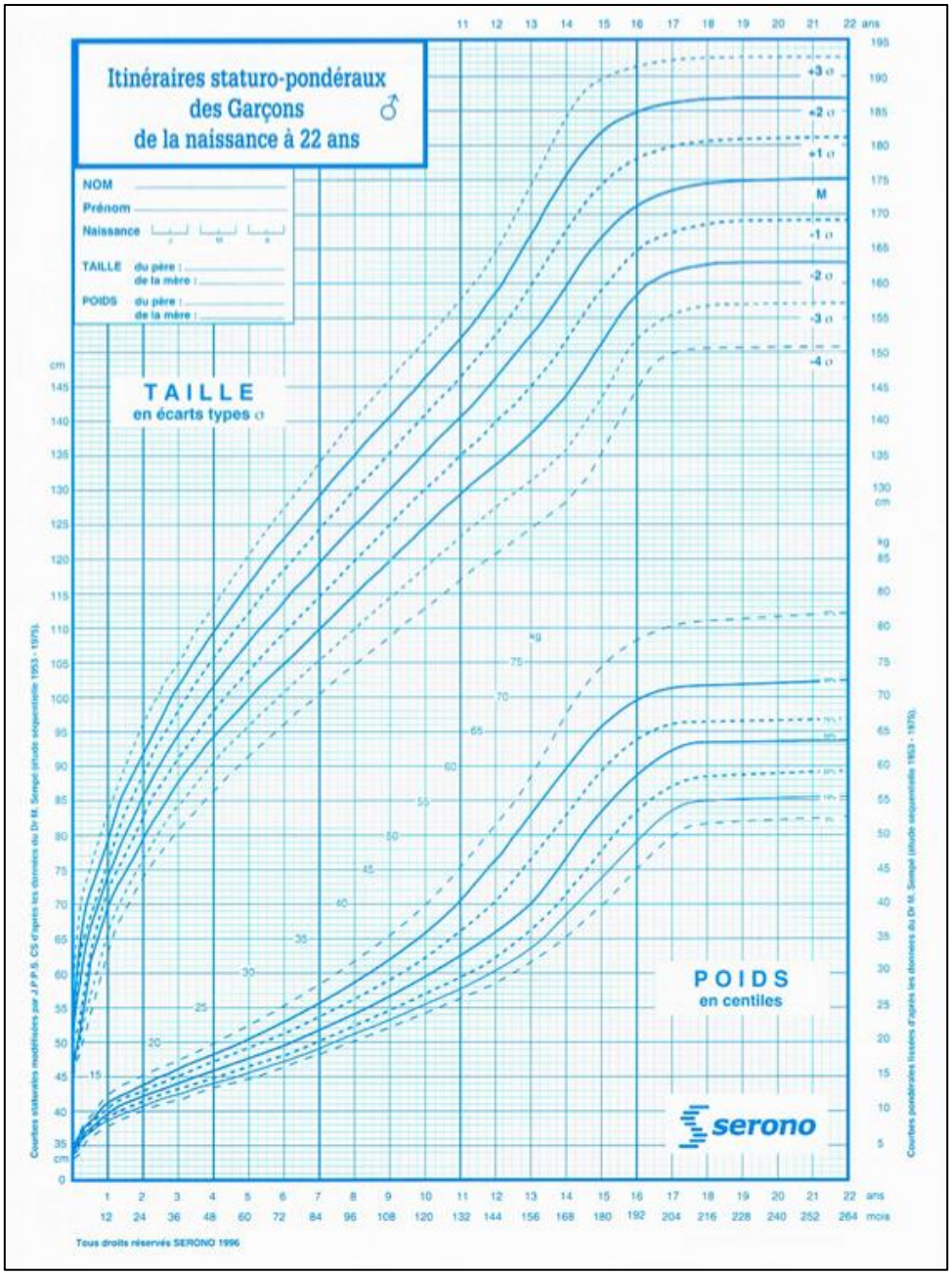


Figure 148 : Les Courbes Staturo-pondérales, garçons, modélisés.
D'après les données du Pr Sempé (Réf : [137])

c. Le poids

Le poids des enfants et des adolescents recrutés par nous-même a été mesuré à mon domicile, en utilisant un « pèse-personne électronique » de marque « Beurer GS 20 summer sun ». Il présente quelques caractéristiques :

- Aspect Sandwich ;
- Affichage LCD ;
- Arrêt automatique ;
- Taille des chiffres : 44 mm ;
- Capacité de charge : 180 kg ;

- Graduation : 100 g ;
- Réglable sur : Kilogrammes (kg) / Livres (lb) / Stones (st)

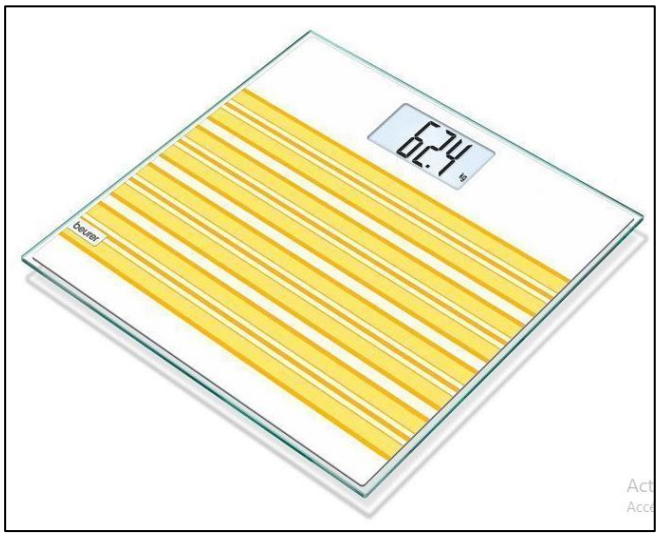


Figure 149 : pèse-personne électronique

Pour les enfants et les adolescents recrutés dans l'hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse », leur poids a été mesuré dans la « salle de consultation », par le Docteur BOUHOUCHE, en utilisant un « pèse-personne mécanique ».

Les valeurs du poids sont exprimées en **Kilogramme** (**kg**).

L'évaluation passagère de l'état pondéral des enfants et des adolescents de la population, en utilisant les « Courbes Pondérales », montre une harmonie générale dans leur développement par rapport à l'âge et au sexe.

La « Courbe Pondérale » en référence utilisée pour cette évaluation, pour les filles et les garçons de 0 à 22 ans, est celle de Sempé et al. (Fig. 147-148, et voir aussi dans : ANNEXES)

B. L'Indice de Masse Corporelle (IMC) :

L'IMC, acronyme (ou initiales abréviatives) de l'indice de masse corporelle, est dit aussi indice de corpulence, ou Body Mass Index (BMI) des anglo-saxons. Inventé par le mathématicien belge Adolphe Quételet (1796-1874), l'IMC permet d'apprécier la courbe pondérale rapportée à la taille, et reflète indirectement la masse grasse corporelle [27].

a. Le calcul

L'indice de Quételet est calculé à tous les âges, il correspond au rapport du poids sur la taille, comme suit [27, 49, 135] :

IMC = Poids (kg) **/ Taille²** (m^2)

Ce calcul simple et pertinent, pour qu'il soit reporté sur une courbe de corpulence, nécessite d'être rapporté à l'âge et au sexe.

b. Le choix des courbes de corpulence pour enfants et adolescents

Pour assurer la « compatibilité » de nos mesures, en ce qui concerne la méthode d'évaluation de l'AO, la taille, le poids et maintenant l'IMC, nous nous

trouvons conduits vers la même approche, et par conséquent les mêmes « standards » sur lesquels est bâtie la méthode de Sempé.

La « Courbe de Corpulence » en référence utilisée pour évaluer l'indice de corpulence, pour les filles et les garçons de 0 à 18 ans, est celle de Sempé et al. (Fig. 150-151, et voir aussi dans : ANNEXES)

Ces courbes de corpulence ont été élaborées à partir des données de l'étude séquentielle française de la croissance du Centre International de l'Enfance, dirigée par le Professeur Michel SEMPE, complétées par les courbes de référence de l'International Obesity Task Force (IOTF). Cet IOTF fait atteindre les valeurs 25 pour le surpoids (IOTF-25) et 30 pour l'obésité (IOTF-30) à l'âge de 18 ans (voir : [Courbes de corpulence pour les garçons de 0 à 18 ans et pour les filles de 0 à 18 ans (irbms.com)]).

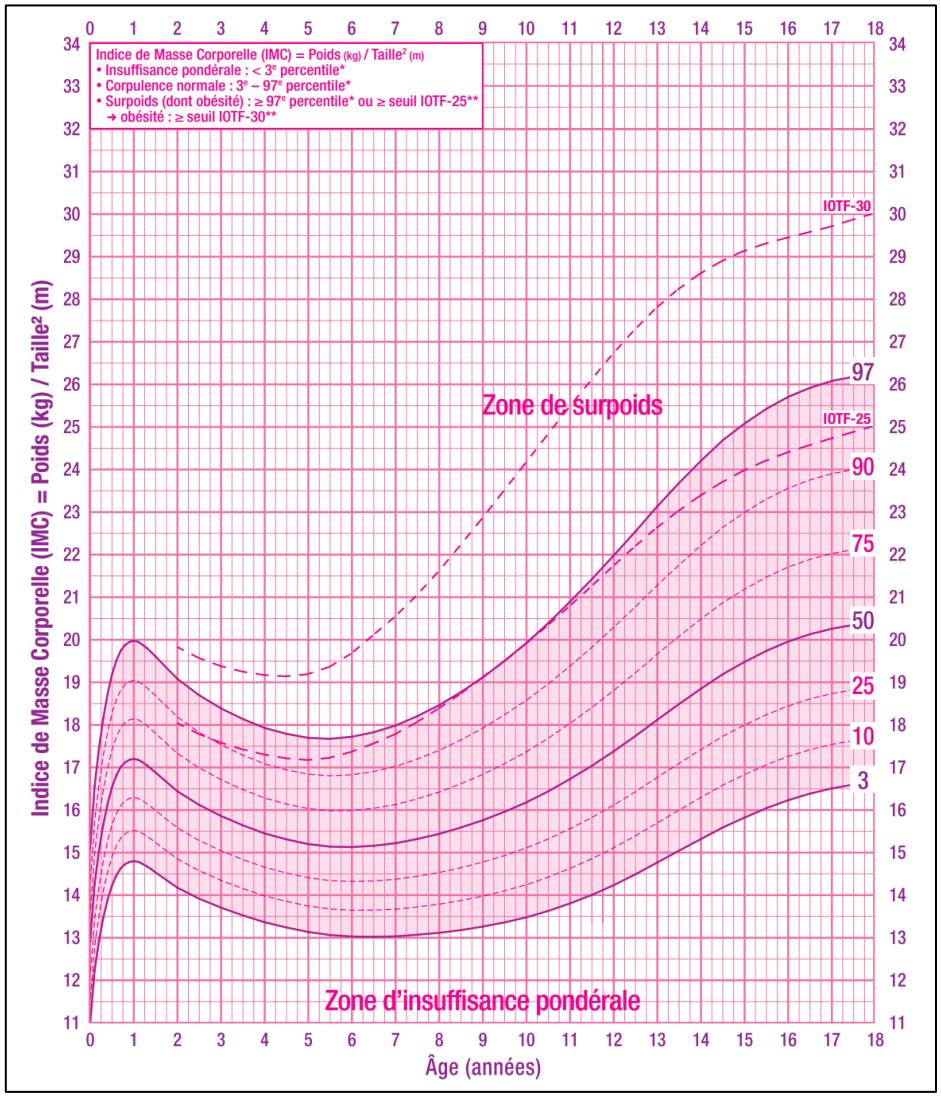


Figure 150 : La Courbe de corpulence, filles, modélisés. D'après les données du Pr Sempé

Réf : ([137] ; site web : [Courbes de corpulence pour les garçons de 0 à 18 ans et pour les filles de 0 à 18 ans (irbms.com)]

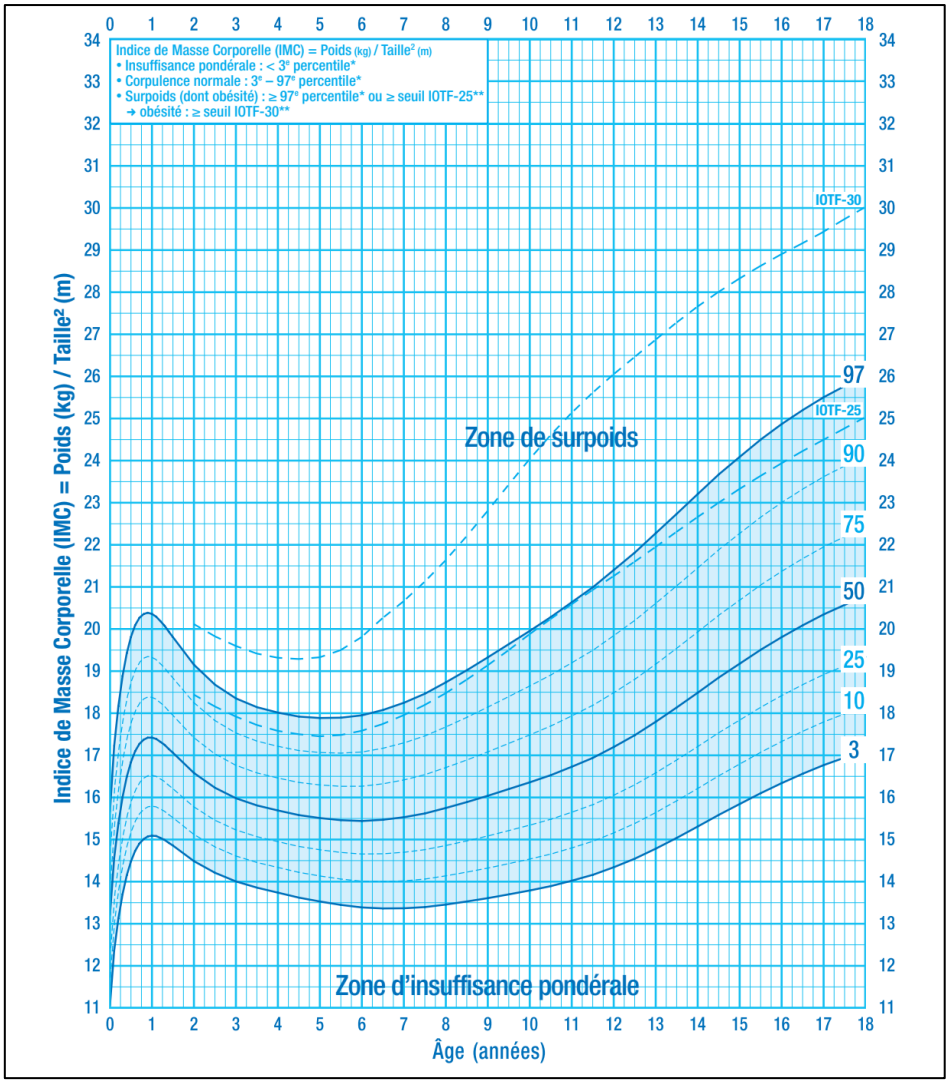


Figure 151 : La Courbe de corpulence, garçons, modélisés. D'après les données du Pr Sempé
Réf : ([137] ; site web : [Courbes de corpulence pour les garçons de 0 à 18 ans et pour les filles de 0 à 18 ans (irbms.com)])

c. Le classement

Ces courbes de corpulence sont établies en centiles, ce qui permet de définir trois catégories de corpulence [27, 38, 49] :

- Les zones d'insuffisance pondérale :
  - IMC < 3ème percentile
  - Les enfants de cette zone sont appelés « Maigres » ;
- Les zones de normalité :
  - Ici : 3ème percentile < IMC < 97ème percentile ;
  - Les enfants de cette zone sont appelés « Normaux » ;
  - Cette catégorie de corpulence normale, peut être scindée en deux groupes, de part et d'autre du 50ème percentile, appelés « Normaux Moins » et « Normaux Plus » ;
- Les zones d'excès pondéral :
  - IMC > 97ème percentile ;

- Les enfants de cette zone sont appelés « Obèses » ;
- Sur cette zone, sont désignés deux couloirs d'excès pondéral : (1) le degré 1 ou le surpoids (IMC > 25 kg/m^2), et (2) le degré 2 ou l'obésité (IMC > 30 kg/m^2).

N.B. :

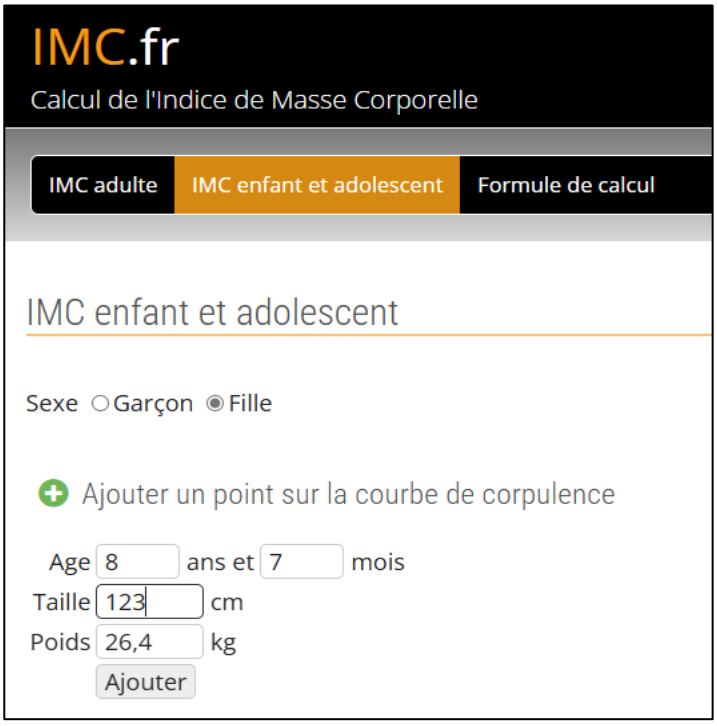
Sur la courbe de corpulence, la remontée de l'IMC après 6 ans est appelée « le rebond d'adiposité » : s'il survient trop tôt et en excès, il comporte un risque élevé de développer une obésité dès l'enfance et surtout à l'âge adulte. Le suivi de ce « rebond » sur la courbe de corpulence permet de repérer précocement un changement de couloir de corpulence [27].

C. Les mesures anthropométriques de la population d'étude :

Pour éviter le calcul manuel et assurer un calcul de l'IMC facile et rapide, nous sommes allés chercher un « calculateur de l'IMC », en ligne et gratuit, sur le Net. Il y a des sites web nombreux qui proposent des applications de calcul, dédiées à l'IMC, par rapport à l'âge et au sexe de l'enfant et de l'adolescent, le meilleur parmi plusieurs est celui qu'on va l'utiliser : « **IMC.fr**, Calcul de l'Indice de Masse Corporelle », l'accès sur le lien électronique : IMC enfant et IMC adolescent : calcul et informations

Ce « calculateur » (Fig. 152) :

- Accepte un âge en années et en mois ;
- Accepte une taille en centimètres ;
- Accepte un poids en kilogrammes, et en virgule ;
- donne rapidement la valeur de l'IMC ;
- interprète et rapporte la valeur sur une courbe personnalisée d'IMC.



AGE	TAILLE / POIDS	IMC	
8 ans et 7 mois	123 cm / 26.4 kg	17.4	Supprimer

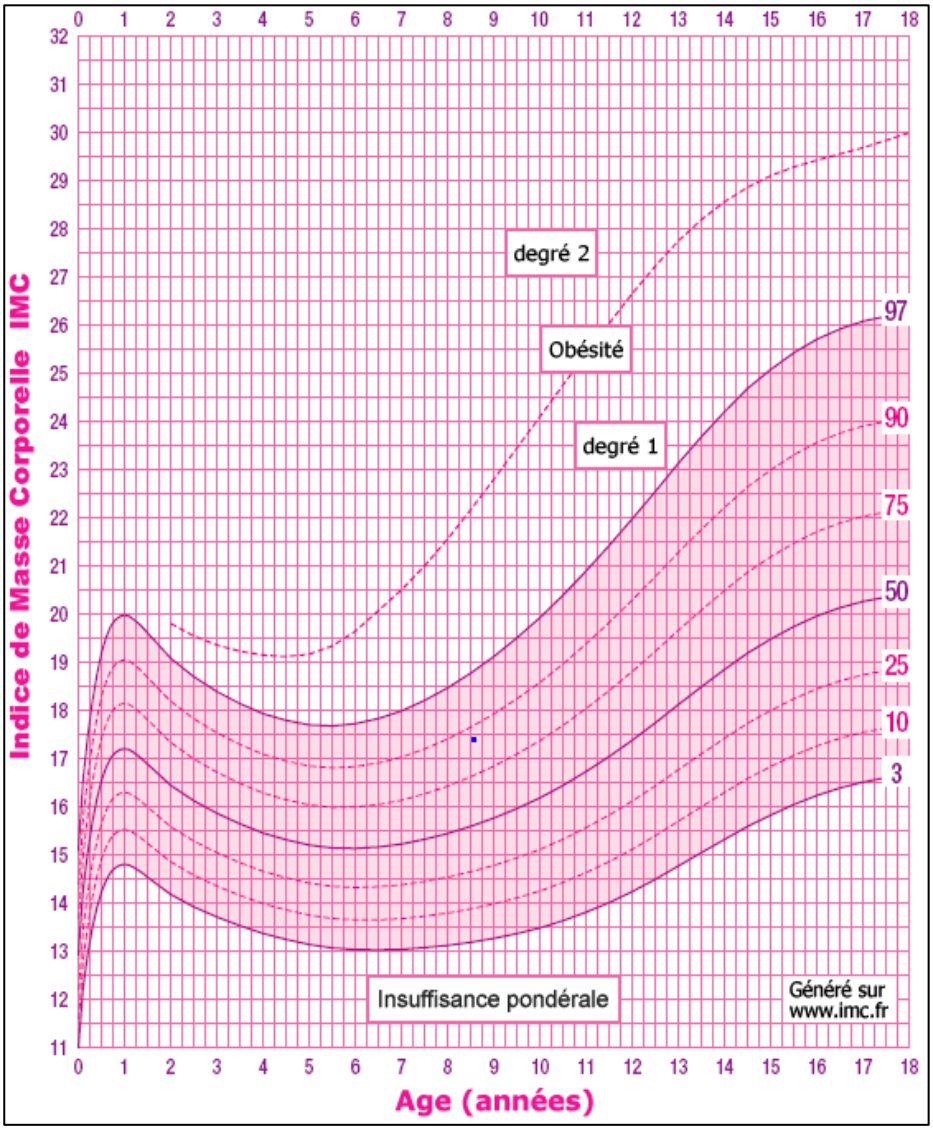


Figure 152 : Le calculateur électronique de l'IMC, « IMC.fr »

De cette manière et après toutes ces explications, nous allons reporter sur la liste de notre échantillon, pour chaque enfant et adolescent : sa taille, son poids et son IMC, sur lequel nous allons classer les sujets de l'échantillon, chacun dans sa catégorie de corpulence, selon sa « projection » sur la courbe de corpulence.

a. <u>La population d'étude et ses mesures anthropométriques :</u>

En ci-après la totalité de l'échantillon avec, pour chaque enfant et adolescent, sa taille en cm, son poids en kg, son IMC en **kg/m²** et le classement de ce dernier par rapport aux catégories de corpulence.

Tableau 45 : La population recrutée (3)

Les mesures anthropométriques (D'après : Fiche de renseignements)

N°	N° Dossier	Nom et Prénom	Sexe (M/F)	Age civil (AC) (années, mois)	Taille (cm)	Poids (kg)	Indice de Masse Corporelle (IMC) IMC = Poids/Taille² (kg/m²)		
							Maigre	Normal	Obèse
01	001/2012	B. Oussama	M	4 ans (48 mois)	82	12		17,8	
02	002/2013	A. Rahaf	F	8 ans, 8 mois (104 mois)	123,5	26,4		117,4	
03	003/2013	A. Ranim	F	8 ans (96 mois)	122	28,7			19,6
04	004/2013	A. Taha	M	2 ans, 3 mois (27 mois)	85,5	13,9			19,2
05	005/2013	S. Mosaab	M	7 ans, 1 mois (85 mois)	122,5	26,2		17,6	
06	006/2013	S. Tesnim	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	104,5	17,7		16,4	
07	007/2013	K. Malek	F	4 ans, 1 mois (49 mois)	101,5	19			18,6
08	008/2013	K. Amani Naouara	F	8 ans, 1 mois (97 mois)	125	29,6			18,9
09	009/2013	K. Ouassim	M	3 ans, 8 mois (44 mois)	102	19			18,3
10	010/2013	A. Rafif	F	1 an, 1 mois (13 mois)	68	9,3			20,1
11	011/2013	R. Djoumana	F	1 an, 3 mois (15 mois)	77	9,7		16,4	
12	012/2014	A. Amine Arrehmane	M	5 ans (60 mois)	106	17,7		15,8	
13	013/2014	B. Alae	F	1 an (12 mois)	73	10,3		19,3	
14	014/2014	B. Ibrahim Anes	M	2 ans, 9 mois (33 mois)	95	13,3		14,7	
15	015/2014	K. Abdelmoumen	M	5 ans, 4 mois (64 mois)	117	22,1		16,1	
16	016/2014	K. Imen	F	9 ans (108 mois)	137	31,2		16,6	
17	017/2014	K. Amina	F	10 ans, 7 mois (127 mois)	145	34,5		16,4	
18	018/2014	D. Halima	F	3 ans, 9 mois (45 mois)	105,5	19,8		18	
19	019/2014	D. Aroua	F	10 mois	70	9,9			20,2
20	020/2014	D. Razane	F	7 mois	67	7,5		16,7	
21	021/2014	D. Mohamed Chahid	M	2 ans, 1 mois (25 mois)	86	14,4			19,5
22	022/2014	D. Tasbih Alabrar	F	5 ans, 10 mois (70 mois)	110	23,6			19,5
23	023/2014	D. Raed Salah	M	2 ans, 6 mois (30 mois)	85	12,1		16,7	
24	024/2014	L. Fatima	F	2 ans, 8 mois (32 mois)	92	16,8			19,8
25	025/2014	L. Amine	M	13 ans (156 mois)	157	49,6		20,1	
26	026/2014	B. Raihane	F	8 ans, 11 mois (107 mois)	152	40,9		17,7	
27	027/2014	B. Ghofrane	F	10 ans, 8 mois (128 mois)	150	31,6		14	
28	028/2014	B. Selmane	M	4 ans, 5 mois (53 mois)	102	18,8			18,1

29	029/2014	M. Mohamed Raouf	M	6 ans, 11 mois (83 mois)	131	28		16,3	
30	030/2014	M. Chouaib	M	13 ans, 8 mois (164 mois)	172	59		19,9	
31	031/2014	M. Nouaim	M	9 ans, 8 mois (116 mois)	141	43			21,6
32	032/2014	B. Ayoub	M	5 ans, 5 mois (65 mois)	108	20,4		17,5	
33	033/2014	B. Insaf	F	2 ans, 3 mois (27 mois)	83	13,4			19,5
34	034/2014	R. Khaled	M	7 ans, 2 mois (86 mois)	115	19,98		15,1	
35	035/2014	O. Kaouter	F	8 ans, 5 mois (101 mois)	127	26,5		16,4	
36	036/2014	O. Malek	F	6 ans, 7 mois (79 mois)	128,5	32			19,5
37	037/2014	G. Anes	M	4 ans, 5 mois (53 mois)	109	17		14,3	
38	038/2014	G. Aroua	F	2 ans, 3 mois (27 mois)	88	13		16,8	
39	039/2014	B. Abdelali	M	10 ans, 3 mois (123 mois)	141	40		20,1	
40	040/2014	B. Akram	M	8 ans (96 mois)	129	25		15	
41	041/2014	B. Abir	F	11 ans, 11 mois (143 mois)	137	36		19,2	
42	042/2014	B. Islam	M	5 ans, 11 mois (71 mois)	121	24,9		17	
43	043/2014	B. Anes	M	4 ans, 6 mois (54 mois)	108	21,5			18,4
44	044/2014	B. Raed	M	8 mois	71	8		15,9	
45	045/2014	H. Abderraouf	M	8 mois	70	9		18,4	
46	046/2014	S. Malek	F	10 ans, 1 mois (121 mois)	148	43		19,6	
47	047/2014	O Mohamed	M	3 mois	60	6,5		18,1	
48	048/2014	O Ahmed	M	7 ans, 7 mois (91 mois)	111	17,7		14,4	
49	049/2014	R. Jihène	F	5 ans, 5 mois (65 mois)	115	21		15,9	
50	050/2014	M. Salsabil	F	6 ans, 3 mois (75 mois)	102	26			25
51	051/2014	A. Amor	M	2 ans, 1 mois (25 mois)	87	14		18,5	
52	052/2014	R. Mohamed	M	1an, 7 mois (19 mois)	83	9	13,1		
53	053/2014	S. Hiba	F	3 ans, 11 mois (47 mois)	105	17		15,4	
54	054/2014	M. Fatma Zohra	F	3 ans (36 mois)	105	19		17,2	
55	055/2014	B. Hadjer	F	3 ans (36 mois)	101	16		15,7	
56	056/2014	S. Barae	M	8 mois	72	11			21,2
57	057/2014	L. Rami	M	7 ans, 10 mois (94 mois)	115	19		14,4	
58	058/2014	O. Fatma	F	8 ans, 6 mois (102 mois)	122	26		17,5	
59	059/2014	O. Aicha	F	4 ans, 11 mois (59 mois)	114	22		16,9	
60	060/2014	M. Ismahène	F	2 ans, 1 mois (25 mois)	98	13	13,5		

61	061/2014	H. Sofiane	M	1 an, 3 mois (15 mois)	75	10,1		18	
62	062/2014	S. Abdelmalek	M	1 an, 6 mois (18 mois)	67	9,1		20,3	
63	063/2014	L. Fedoua	F	1 an, 5 mois (17 mois)	66	7		16,1	
64	064/2014	K. Nour Imene	F	1 an, 11 mois (23 mois)	73	9,5		17,8	
65	065/2014	B. Alaeddine	M	9 ans, 8 mois (116 mois)	141	39		19,6	
66	066/2014	B. Lina Samar	F	4 ans, 2 mois (50 mois)	104	19		17,6	
67	067/2014	B. Mourad	M	8 ans, 9 mois (105 mois)	123	25		16,5	
68	068/2014	K. Mohcen	M	1 an, 1 mois (13 mois)	69	9,5		20	
69	069/2014	B. Nour	F	9 ans, 11 mois (119 mois)	149	43		19,4	
70	070/2014	B. Achraf	M	9 mois	77	12		20,2	
71	071/2014	M. Rassim	M	4 ans, 1 mois (49 mois)	110	20		16,5	
72	072/2014	O. Rawen	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	105	19,6		17,8	
73	073/2014	O. Ayoub	M	2 ans, 4 mois (28 mois)	88	13		16,8	
74	074/2014	B. Mouad	M	1 an, 11 mois (23 mois)	73	9,7		18,2	
75	075/2014	R. Islam	M	8 ans, 8 mois (104 mois)	126	26,1		16,4	
76	076/2014	A. Moatez	M	3 ans, 1 mois (37 mois)	100	18,1		18,1	
77	077/2014	T. Abderrahim	M	4 ans, 7 mois (55 mois)	106	20		17,8	
78	078/2014	F. Roumaissa	F	2 ans (24 mois)	87	14		18,5	
79	079/2014	B. Serine	F	1 an, 1 mois (13 mois)	69	9,1		19,1	
80	080/2014	Z. Ghania	F	6 ans, 5 mois (77 mois)	99	19,5			19,9
81	081/2014	T. Meriem	F	7 ans, 7 mois (91 mois)	117	19,9		14,5	
82	082/2014	M. Houcine	M	6 ans, 9 mois (81 mois)	128	27		16,5	
83	083/2014	B. Belkis	F	2 ans, 5 mois (29 mois)	90	15		18,5	
84	084/2014	D. Iyed	M	4 ans (48 mois)	119	19	13,4		
85	085/2014	B. Nourelhouda	F	9 ans, 1 mois (109 mois)	143	38,5		18,8	
86	086/2014	D. Rahma	F	1 an, 2 mois (14 mois)	70	8,7		17,8	
87	087/2014	B. Nadjmeddine	M	1 an (12 mois)	68	9,2		19,9	
88	088/2014	B. Hadil	F	4 ans, 1 mois (49 mois)	102	17		16,3	
89	089/2014	B. Nourelhouda	F	8 ans, 11 mois (107 mois)	127	23		14,3	
90	090/2014	H. Mohamed	M	8 ans (96 mois)	123	28		18,5	
91	091/2014	S. Soundous	F	2 ans (24 mois)	89	14,5		18,3	

92	092/2014	N. Mohamed Aymen	M	1 an (12 mois)	70	11			22,4
93	093/2014	K. Rokaya	F	11 ans, 9 mois (141 mois)	169	45		15,8	
94	094/2014	B. Ikram	F	10 ans, 1 mois (121 mois)	148	28,5	13		
95	095/2014	B. Rihem	F	1 an, 10 mois (22 mois)	69	8,9		18,7	
96	096/2014	D. Lina	F	10 ans, 3 mois (123 mois)	146	40		18,8	
97	097/2014	Z. Salsabil	F	8 ans, 2 mois (98 mois)	120	26		18,1	
98	098/2014	G. Chaima	F	5 ans, 1 mois (61 mois)	118	20,1		14,4	
99	099/2015	B. Fouad	M	7 mois	73	10,1		19	
100	100/2015	B. Adam	M	1 an, 3 mois (15 mois)	70	9,2		18,8	
101	101/2015	D. Majid	M	6 ans, 11 mois (83 mois)	121	26,1		17,8	
102	102/2015	H. Olfa	F	9 ans, 1 mois (109 mois)	141	37		18,6	
103	103/2015	H. Zaineb	F	7 ans, 11 mois (95 mois)	119	19,9		14,1	
104	104/2015	A. Ayad	M	2 ans, 1 mois (25 mois)	89	14,7		18,6	
105	105/2015	B. Malissa	F	9 mois	68	8,9		19,2	
106	106/2015	C. Abdeldjalil	M	5 ans, 11 mois (71 mois)	103	15,7		14,8	
107	107/2015	A. Khireddine	M	10 ans, 7 mois (127 mois)	141	48,9			24,6
108	108/2015	A. Bouthaina	F	14 ans, 1 mois (169 mois)	175	46,1	15,1		
109	109/2015	M. Mohamed	M	2 ans, 11 mois (35 mois)	87	12		15,9	
110	110/2015	M. Karima	F	11 ans, 6 mois (138 mois)	146	26	12,2		
111	111/2015	B. Oussama	M	6 ans, 1 mois (73 mois)	155	38		15,8	
112	112/2015	F. Nesrine	F	3 ans, 6 mois (42 mois)	66	9,5			21,8
113	113/2015	T. Anis	M	12 ans, 4 mois (148 mois)	138	35		18,4	
114	114/2015	S. Mohamed Zine	M	10 ans, 10 mois (130 mois)	135	30		16,5	
115	115/2015	L. Abdelmoumen	M	1 an (12 mois)	66	7,9		18,1	
116	116/2015	B. Souha	F	8 ans, 2 mois (98 mois)	119	29,8			21
117	117/2015	C. Khalil	M	5 ans, 1 mois (61 mois)	111	18		14,6	
118	118/2015	M. Soumaia	F	7 ans (84 mois)	122	27		18,1	
119	119/2015	B. Abdelmouaz	M	2 ans, 6 mois (30 mois)	87	19			23,3
120	120/2023	C. Abdelmoumen	M	16 ans, 1 mois (193 mois)	184	78		23	
121	121/2023	A. Taha	M	11 ans, 11 mois (143 mois)	156	53,7			22,1
122	122/2023	A. Ranim	F	16 ans, 6 mois (198 mois)	156	57,9		23,8	
123	123/2023	A. Rafif	F	11 ans	148	45		20,5	

				(132 mois)					
124	124/2024	K. abdelmoumen	M	15 ans, 11 mois (191 mois)	182	89,8			27,1
125	125/2024	A. Rouae	F	5 mois	64	7		17,1	
126	126/2024	G. Anes	M	14 ans, 9 mois (177 mois)	173	56		18,7	
127	127/2024	G. Aroua	F	12 ans, 8 mois (152 mois)	159	42		16,6	
128	128/2024	B. Raed	M	11 ans, 1 mois (133 mois)	145	43		20,5	
129	129/2024	B. Islem	M	16 ans, 4 mois (196 mois)	185	65,5		19,1	
130	130/2024	B. Anes	M	14 ans, 10 mois (178 mois)	178	76			24
131	131/2024	B. Ibrahim	M	13 ans, 5 mois (161 mois)	162	40		15,2	
132	132/2024	B. Alae	F	11 ans, 8 mois (140 mois)	148	34		15,5	
133	133/2024	R. Zayneb	F	13 ans, 5 mois (161 mois)	159	46,9		18,6	
134	134/2024	A. Amine	M	15 ans, 9 mois (189 mois)	165	64		23,5	
135	135/2024	K. Sirine	F	15 ans, 8 mois (188 mois)	163	40	15,1		
136	136/2024	H. Yasmine	F	15 ans, 7 mois (187 mois)	160	50		19,5	
137	137/2024	O. Hibat Arrehmane	F	13 ans, 9 mois (165 mois)	153	56		23,9	
138	138/2024	F. Alae	F	16 ans, 11 mois (203 mois)	159	60		23,7	

b. <u>La répartition par rapport à l'IMC :</u>

Du point de vue corpulence, la majorité des sujets de l'échantillon sont « Normaux » (105 soit 76,08 %), et pour les sujets qui se trouvent de part et d'autre de la normalité, ce sont les « Obèses » qui prédominent (26 soit 18,84 %) par rapport aux « Maigres », sans différence significative entre filles et garçons.

Tableau 46 : La répartition de l'échantillon par rapport aux catégories de l'IMC, par sexe

Catégories d'IMC	Garçons		Filles		Total	
	Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
Sujets « Maigres »	2	1,44	5	3,62	7	**5,07**
Sujets « Normaux »	53	38,40	52	37,68	105	**76,08**
Sujets « Obèses »	13	9,42	13	9,42	26	**18,84**
Total	**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

(5) LE STATUT SOCIO-ECONOMIQUE

Le statut socio-économique de la population d'étude, communément abrégé en SSE, est le niveau social et économique des familles des enfants et des adolescents qui constituent cette population.

Des études évaluées suggèrent qu'il existe un potentiel de maturation squelettique, génétiquement déterminé, qui ne dépend pas de l'origine ethnique, et qui est disponible pour être exploité dans des conditions environnementales optimales, c'est-à-dire un SSE élevé [38, 94, 130], alors qu'un environnement moins favorable peut conduire à un retard de maturation squelettique [130].

Le SSE d'une population donnée, est alors d'une importance décisive pour le taux d'ossification, et son influence sur la maturation squelettique est prédominante et significative : plus le niveau est favorisé, plus la maturation est avancée [38, 130].

Même les différences de maturation squelettique généralement notées sont temporelles et du ressort du développement socio-économique de la population étudiée [67], et doivent être interprétés en fonction de l'ensemble des facteurs socio-économiques et nutritionnels : la disponibilité de la nourriture, la compréhension de la nutrition, l'absence relative de maladies infectieuses importantes, le pouvoir d'achat des unités familiales, le logement, l'assainissement public [7, 107].

A. Les critères déterminant des SSE :

Dans le but de clarifier le sens de « statut socio-économique », et de déterminer ses critères, qui doivent être observables et mesurables, plusieurs auteurs ont proposés autant de critères [4bis, 15, 38, 67, 94, 116], énumérés en ci-dessous :

- L'état de santé de l'individu et par extension celui de la communauté ;
- Le niveau de santé et la qualité du système sanitaire (espérance de vie et mortalité infantile) ;
- La meilleure accessibilité aux soins médicaux ;
- L'état nutritionnel ;
- L'alimentation suffisante et équilibrée ;
- Le droit à l'éducation ;
- Le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant ;
- Le revenu convenable et stable ;
- L'habitat adéquat et salubre ;
- La maison équipée des accessoires (eau courante, électricité, téléphone fixe, sanitaire intérieur, réfrigérateur, fer à courant, cuisinière électrique ou à gaz, poste téléviseur) ;
- La possession d'un véhicule personnel ;
- La profession des parents (assure des conditions de vie satisfaisantes) ;

- Le niveau d'étude et d'instruction des parents (acquisition de connaissances de base sur les apports nutritionnelles équilibrés, les règles d'hygiène, l'importance de l'activité sportive) ;
- Les revenus et les dépenses des familles ;
- La vie dans une communauté urbaine ou rurale (la population urbaine est un critère important en termes de niveau socio-économique) ; etc…

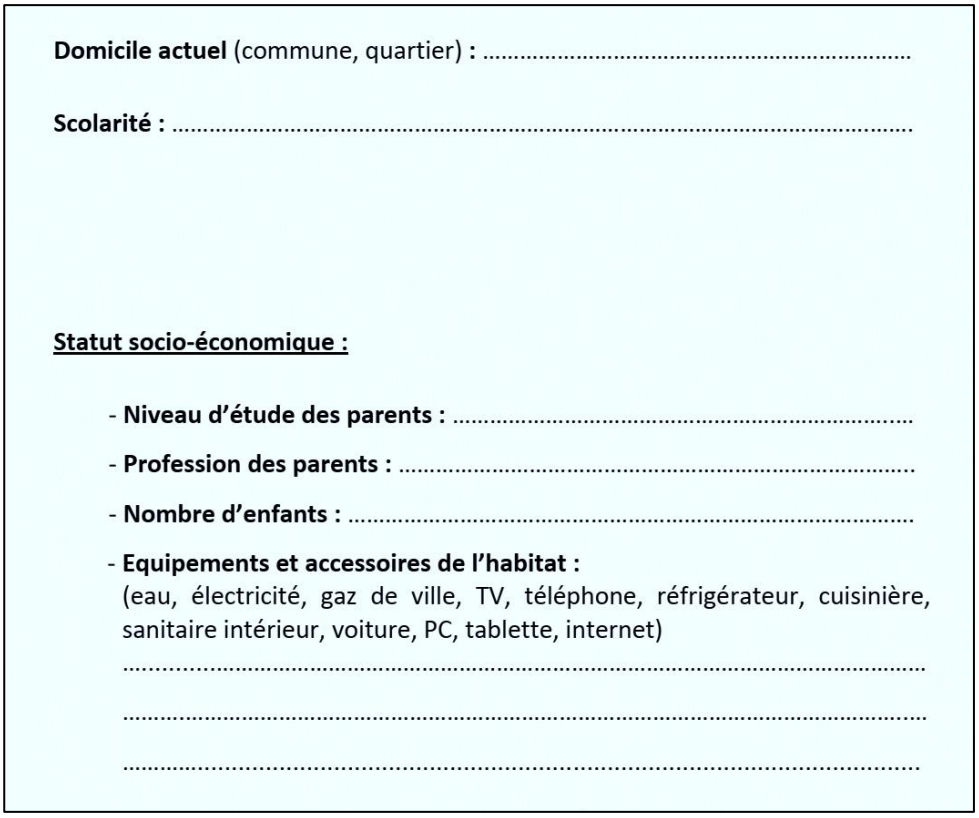
De notre part, et en inspirant des données des études précédentes, nous allons collecter les caractéristiques du SSE des individus de notre échantillon afin d'apprécier le contexte familial dans lequel vit l'enfant et l'adolescent.

Le SSE sera évalué alors, sur la réponse aux critères suivants :

- **Les parents :** vivants, niveau d'étude, profession ;
- **Les enfants ou la fratrie :** nombre, scolarisation ;
- **Le domicile :** urbain ou rural ;
- **L'habitat :** confort, équipements et accessoires (eau, électricité, gaz de ville, TV, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur) ;
- **Moyens de transport :** voiture personnelle, transport commun ;
- **Moyens de télécommunication :** téléphone, smartphone, PC, tablette, internet.

B. La fiche des renseignements, « Deuxième partie » :

Sur la « Fiche de renseignements », citée plus haut, figure la deuxième partie réservée au « Questionnaire », sur lequel sont mentionnées des informations à récolter sur le SS (Fig. 153).


Domicile actuel (commune, quartier) **:** ……

Scolarité : ……

Statut socio-économique :

- **Niveau d'étude des parents :** ……
- **Profession des parents :** ……
- **Nombre d'enfants :** ……
- **Equipements et accessoires de l'habitat :**
  (eau, électricité, gaz de ville, TV, téléphone, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur, voiture, PC, tablette, internet)
  ……
  ……
  ……

Figure 153 : La deuxième partie de la « Fiche de renseignements », le SSE

Dans ce questionnaire, dédié au SSE, apparaît notre choix concernant les critères à chercher pour consulter le niveau socio-économique de l'enfant ou de l'adolescent. Citons :

- Le domicile actuel, urbain ou rural ;
- La scolarité de l'enfant ;
- Le niveau d'étude des parents et leur profession ;
- La fratrie ;
- L'habitat et ses équipements.

C. Le classement :

Dans le cadre d'exploitation des données concernant le SSE, il sera intéressant de le diviser en « niveaux » qui vont nous permettre de distinguer l'impact de chaque « niveau » sur la maturation squelettique.

En effet, et d'ailleurs ce que les études suggèrent [4bis, 38, 94, 116], le SSE sera jugé, tout dépend les données récoltées, en trois niveaux distincts : haut, moyen et bas.

Ces « niveaux », appelés « groupes socio-économiques » ou « GSE », se classent en fonction, particulièrement, de la profession des parents, de leur niveau d'étude et du type de logement, en :

- Groupe socio-économique favorisé (F) :
  Si la réponse était partout affirmative.
  D'habitude, un groupe favorisé comprend les enfants dont leurs pères sont instruits, qui travaillent de façon stable, avec un revenu acceptable, et habitent un logement équipé.
- Groupe socio-économique moyennement favorisé (mF) :
  Si la réponse était tantôt affirmative, tantôt négative.
  D'habitude, un groupe moyennement favorisé comprend les enfants dont leurs pères sont moyennement instruits, qui travaillent avec un revenu insuffisant, et habitent un logement loué ou exigu.
- Groupe socio-économique défavorisé (dF) :
  Si la réponse était presque partout négative.
  D'habitude, un groupe défavorisé comprend les enfants dont leurs pères sont moins instruits ou de niveau scolaire bas ou analphabètes, qui ne travaillent pas, avec un revenu journalier instable, et habitent un logement loué, exigu ou instable.

D. Le statut socio-économique de la population d'étude :

De cette manière, après ces éclaircissements, nous allons classer sur la liste de notre échantillon, chaque enfant et adolescent, dans son GSE.

a. La population d'étude et son statut socio-économique :

En ci-après, la totalité de l'échantillon avec, pour chaque enfant et adolescent, son SSE par rapport au classement en groupe SE.

Tableau 47 : La population recrutée (4)

Le Statut Socio-Economique (D'après : Fiche de renseignements)

N°	N° Dossier	Nom et Prénom	Sexe (M/F)	Age civil (AC) (années, mois)	Statut Socio-Economique (SSE)		
					Favorisé (F)	Moyennement favorisé (mF)	Défavorisé (dF)
01	001/2012	B. Oussama	M	4 ans (48 mois)	F		
02	002/2013	A. Rahaf	F	8 ans, 8 mois (104 mois)	F		
03	003/2013	A. Ranim	F	8 ans (96 mois)	F		
04	004/2013	A. Taha	M	2 ans, 3 mois (27 mois)	F		
05	005/2013	S. Mosaab	M	7 ans, 1 mois (85 mois)	F		
06	006/2013	S. Tesnim	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	F		
07	007/2013	K. Malek	F	4 ans, 1 mois (49 mois)	F		
08	008/2013	K. Amani Naouara	F	8 ans, 1 mois (97 mois)	F		
09	009/2013	K. Ouassim	M	3 ans, 8 mois (44 mois)	F		
10	010/2013	A. Rafif	F	1 an, 1 mois (13 mois)	F		
11	011/2013	R. Djoumana	F	1 an, 3 mois (15 mois)	F		
12	012/2014	A. Amine Arrehmane	M	5 ans (60 mois)	F		
13	013/2014	B. Alae	F	1 an (12 mois)	F		
14	014/2014	B. Ibrahim Anes	M	2 ans, 9 mois (33 mois)	F		
15	015/2014	K. Abdelmoumen	M	5 ans, 4 mois (64 mois)	F		
16	016/2014	K. Imen	F	9 ans (108 mois)	F		
17	017/2014	K. Amina	F	10 ans, 7 mois (127 mois)	F		
18	018/2014	D. Halima	F	3 ans, 9 mois (45 mois)	F		
19	019/2014	D. Aroua	F	10 mois	F		
20	020/2014	D. Razane	F	7 mois		mF	
21	021/2014	D. Mohamed Chahid	M	2 ans, 1 mois (25 mois)		mF	
22	022/2014	D. Tasbih Alabrar	F	5 ans, 10 mois (70 mois)		mF	
23	023/2014	D. Raed Salah	M	2 ans, 6 mois (30 mois)		mF	
24	024/2014	L. Fatima	F	2 ans, 8 mois (32 mois)	F		
25	025/2014	L. Amine	M	13 ans (156 mois)	F		
26	026/2014	B. Raihane	F	8 ans, 11 mois (107 mois)	F		
27	027/2014	B. Ghofrane	F	10 ans, 8 mois (128 mois)	F		
28	028/2014	B. Selmane	M	4 ans, 5 mois (53 mois)	F		

29	029/2014	M. Mohamed Raouf	M	6 ans, 11 mois (83 mois)	F		
30	030/2014	M. Chouaib	M	13 ans, 8 mois (164 mois)	F		
31	031/2014	M. Nouaim	M	9 ans, 8 mois (116 mois)	F		
32	032/2014	B. Ayoub	M	5 ans, 5 mois (65 mois)	F		
33	033/2014	B. Insaf	F	2 ans, 3 mois (27 mois)	F		
34	034/2014	R. Khaled	M	7 ans, 2 mois (86 mois)		mF	
35	035/2014	O. Kaouter	F	8 ans, 5 mois (101 mois)	F		
36	036/2014	O. Malek	F	6 ans, 7 mois (79 mois)	F		
37	037/2014	G. Anes	M	4 ans, 5 mois (53 mois)	F		
38	038/2014	G. Aroua	F	2 ans, 3 mois (27 mois)	F		
39	039/2014	B. Abdelali	M	10 ans, 3 mois (123 mois)	F		
40	040/2014	B. Akram	M	8 ans (96 mois)	F		
41	041/2014	B. Abir	F	11 ans, 11 mois (143 mois)	F		
42	042/2014	B. Islam	M	5 ans, 11 mois (71 mois)	F		
43	043/2014	B. Anes	M	4 ans, 6 mois (54 mois)	F		
44	044/2014	B. Raed	M	8 mois	F		
45	045/2014	H. Abderraouf	M	8 mois	F		
46	046/2014	S. Malek	F	10 ans, 1 mois (121 mois)	F		
47	047/2014	O Mohamed	M	3 mois	F		
48	048/2014	O Ahmed	M	7 ans, 7 mois (91 mois)	F		
49	049/2014	R. Jihène	F	5 ans, 5 mois (65 mois)	F		
50	050/2014	M. Salsabil	F	6 ans, 3 mois (75 mois)	F		
51	051/2014	A. Amor	M	2 ans, 1 mois (25 mois)	F		
52	052/2014	R. Mohamed	M	1an, 7 mois (19 mois)		mF	
53	053/2014	S. Hiba	F	3 ans, 11 mois (47 mois)	F		
54	054/2014	M. Fatma Zohra	F	3 ans (36 mois)	F		
55	055/2014	B. Hadjer	F	3 ans (36 mois)	F		
56	056/2014	S. Barae	M	8 mois	F		
57	057/2014	L. Rami	M	7 ans, 10 mois (94 mois)	F		
58	058/2014	O. Fatma	F	8 ans, 6 mois (102 mois)	F		
59	059/2014	O. Aicha	F	4 ans, 11 mois (59 mois)	F		
60	060/2014	M. Ismahène	F	2 ans, 1 mois (25 mois)		mF	

61	061/2014	H. Sofiane	M	1 an, 3 mois (15 mois)		mF	
62	062/2014	S. Abdelmalek	M	1 an, 6 mois (18 mois)	F		
63	063/2014	L. Fedoua	F	1 an, 5 mois (17 mois)	F		
64	064/2014	K. Nour Imene	F	1 an, 11 mois (23 mois)	F		
65	065/2014	B. Alaeddine	M	9 ans, 8 mois (116 mois)	F		
66	066/2014	B. Lina Samar	F	4 ans, 2 mois (50 mois)	F		
67	067/2014	B. Mourad	M	8 ans, 9 mois (105 mois)	F		
68	068/2014	K. Mohcen	M	1 an, 1 mois (13 mois)	F		
69	069/2014	B. Nour	F	9 ans, 11 mois (119 mois)	F		
70	070/2014	B. Achraf	M	9 mois	F		
71	071/2014	M. Rassim	M	4 ans, 1 mois (49 mois)	F		
72	072/2014	O. Rawen	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	F		
73	073/2014	O. Ayoub	M	2 ans, 4 mois (28 mois)	F		
74	074/2014	B. Mouad	M	1 an, 11 mois (23 mois)	F		
75	075/2014	R. Islam	M	8 ans, 8 mois (104 mois)	F		
76	076/2014	A. Moatez	M	3 ans, 1 mois (37 mois)	F		
77	077/2014	T. Abderrahim	M	4 ans, 7 mois (55 mois)	F		
78	078/2014	F. Roumaissa	F	2 ans (24 mois)	F		
79	079/2014	B. Serine	F	1 an, 1 mois (13 mois)	F		
80	080/2014	Z. Ghania	F	6 ans, 5 mois (77 mois)	F		
81	081/2014	T. Meriem	F	7 ans, 7 mois (91 mois)	F		
82	082/2014	M. Houcine	M	6 ans, 9 mois (81 mois)	F		
83	083/2014	B. Belkis	F	2 ans, 5 mois (29 mois)	F		
84	084/2014	D. Iyed	M	4 ans (48 mois)		mF	
85	085/2014	B. Nourelhouda	F	9 ans, 1 mois (109 mois)	F		
86	086/2014	D. Rahma	F	1 an, 2 mois (14 mois)	F		
87	087/2014	B. Nadjmeddine	M	1 an (12 mois)	F		
88	088/2014	B. Hadil	F	4 ans, 1 mois (49 mois)	F		
89	089/2014	B. Nourelhouda	F	8 ans, 11 mois (107 mois)	F		
90	090/2014	H. Mohamed	M	8 ans (96 mois)	F		
91	091/2014	S. Soundous	F	2 ans (24 mois)	F		

92	092/2014	N. Mohamed Aymen	M	1 an (12 mois)	F		
93	093/2014	K. Rokaya	F	11 ans, 9 mois (141 mois)	F		
94	094/2014	B. Ikram	F	10 ans, 1 mois (121 mois)		mF	
95	095/2014	B. Rihem	F	1 an, 10 mois (22 mois)	F		
96	096/2014	D. Lina	F	10 ans, 3 mois (123 mois)	F		
97	097/2014	Z. Salsabil	F	8 ans, 2 mois (98 mois)	F		
98	098/2014	G. Chaima	F	5 ans, 1 mois (61 mois)	F		
99	099/2015	B. Fouad	M	7 mois	F		
100	100/2015	B. Adam	M	1 an, 3 mois (15 mois)	F		
101	101/2015	D. Majid	M	6 ans, 11 mois (83 mois)	F		
102	102/2015	H. Olfa	F	9 ans, 1 mois (109 mois)	F		
103	103/2015	H. Zaineb	F	7 ans, 11 mois (95 mois)	F		
104	104/2015	A. Ayad	M	2 ans, 1 mois (25 mois)	F		
105	105/2015	B. Malissa	F	9 mois	F		
106	106/2015	C. Abdeldjalil	M	5 ans, 11 mois (71 mois)	F		
107	107/2015	A. Khireddine	M	10 ans, 7 mois (127 mois)	F		
108	108/2015	A. Bouthaina	F	14 ans, 1 mois (169 mois)		mF	
109	109/2015	M. Mohamed	M	2 ans, 11 mois (35 mois)	F		
110	110/2015	M. Karima	F	11 ans, 6 mois (138 mois)		mF	
111	111/2015	B. Oussama	M	6 ans, 1 mois (73 mois)	F		
112	112/2015	F. Nesrine	F	3 ans, 6 mois (42 mois)	F		
113	113/2015	T. Anis	M	12 ans, 4 mois (148 mois)	F		
114	114/2015	S. Mohamed Zine	M	10 ans, 10 mois (130 mois)	F		
115	115/2015	L. Abdelmoumen	M	1 an (12 mois)	F		
116	116/2015	B. Souha	F	8 ans, 2 mois (98 mois)	F		
117	117/2015	C. Khalil	M	5 ans, 1 mois (61 mois)	F		
118	118/2015	M. Soumaia	F	7 ans (84 mois)	F		
119	119/2015	B. Abdelmouaz	M	2 ans, 6 mois (30 mois)	F		
120	120/2023	C. Abdelmoumen	M	16 ans, 1 mois (193 mois)	F		
121	121/2023	A. Taha	M	11 ans, 11 mois (143 mois)	F		
122	122/2023	A. Ranim	F	16 ans, 6 mois (198 mois)	F		
123	123/2023	A. Rafif	F	11 ans	F		

				(132 mois)			
124	124/2024	K. abdelmoumen	M	15 ans, 11 mois (191 mois)	F		
125	125/2024	A. Rouae	F	5 mois	F		
126	126/2024	G. Anes	M	14 ans, 9 mois (177 mois)	F		
127	127/2024	G. Aroua	F	12 ans, 8 mois (152 mois)	F		
128	128/2024	B. Raed	M	11 ans, 1 mois (133 mois)	F		
129	129/2024	B. Islem	M	16 ans, 4 mois (196 mois)	F		
130	130/2024	B. Anes	M	14 ans, 10 mois (178 mois)	F		
131	131/2024	B. Ibrahim	M	13 ans, 5 mois (161 mois)	F		
132	132/2024	B. Alae	F	11 ans, 8 mois (140 mois)	F		
133	133/2024	R. Zayneb	F	13 ans, 5 mois (161 mois)	F		
134	134/2024	A. Amine	M	15 ans, 9 mois (189 mois)	F		
135	135/2024	K. Sirine	F	15 ans, 8 mois (188 mois)		mF	
136	136/2024	H. Yasmine	F	15 ans, 7 mois (187 mois)	F		
137	137/2024	O. Hibat Arrehmane	F	13 ans, 9 mois (165 mois)	F		
138	138/2024	F. Alae	F	16 ans, 11 mois (203 mois)	F		

b. <u>La répartition par rapport au statut socio-économique :</u>

Du point de vue SSE, la majorité des sujets de l'échantillon appartient au GSE favorisé (125 soit 90,57 %), sans aucune différence entre filles et garçons, c'est-à-dire que la plupart des enfants et des adolescents proviennent des familles de niveau socio-économique aisé. Par ailleurs, il y a peu de sujet à SSE moyen, mais il n'y a aucun sujet à SSE défavorisé.

Tableau 48 : La répartition de l'échantillon par rapport aux groupes SE, par sexe

Groupes socio-économiques	Garçons		Filles		Total	
	Fréquence	%	Fréquence	%	Fréquence	%
GSE favorisé (F)	62	44,92	63	45,65	125	**90,57**
GSE moyennement favorisé (mF)	6	4,34	7	5,07	13	**9,42**
GSE défavorisé (dF)	0	0	0	0	0	**0**
Total	**68**	**49,27**	**70**	**50,72**	**138**	**100**

(6) L'ETUDE STATISTIQUE

L'étude statistique dans le parcours d'une recherche est une étape indispensable qui permet l'exploitation des données et l' « extraction » des conclusions.

Le traitement et l'analyse des données recueillies à partir des outils précédemment évoqués (questionnaire, Maturos, IMC, SSE), qui sont liés à la population d'étude, seront effectués par le Logiciel SPSS, en appliquant plusieurs opérations statistiques, bien ciblées, qui permettent de mieux comprendre la maturation squelettique et ses relations dans notre échantillon, et de la comparer avec ceux des autres études.

Une fois nous avons terminé l'évaluation de l'AO, de l'IMC et du SSE des enfants et des adolescents de notre population, nous allons entamer l'analyse statistique par la saisie des données en utilisant un logiciel adéquat, dédié à cette tâche.

A. Le programme SPSS :

Le SPSS, acronyme de « Statistical Package for the Social Sciences », est un logiciel utilisé pour l'analyse statistique.

Dans notre étude, nous allons utiliser le Logiciel SPSS-PC pour Windows « IBM® SPSS® Statistics, Version 27 » (2020), pour le traitement et l'analyse statistiques des données.

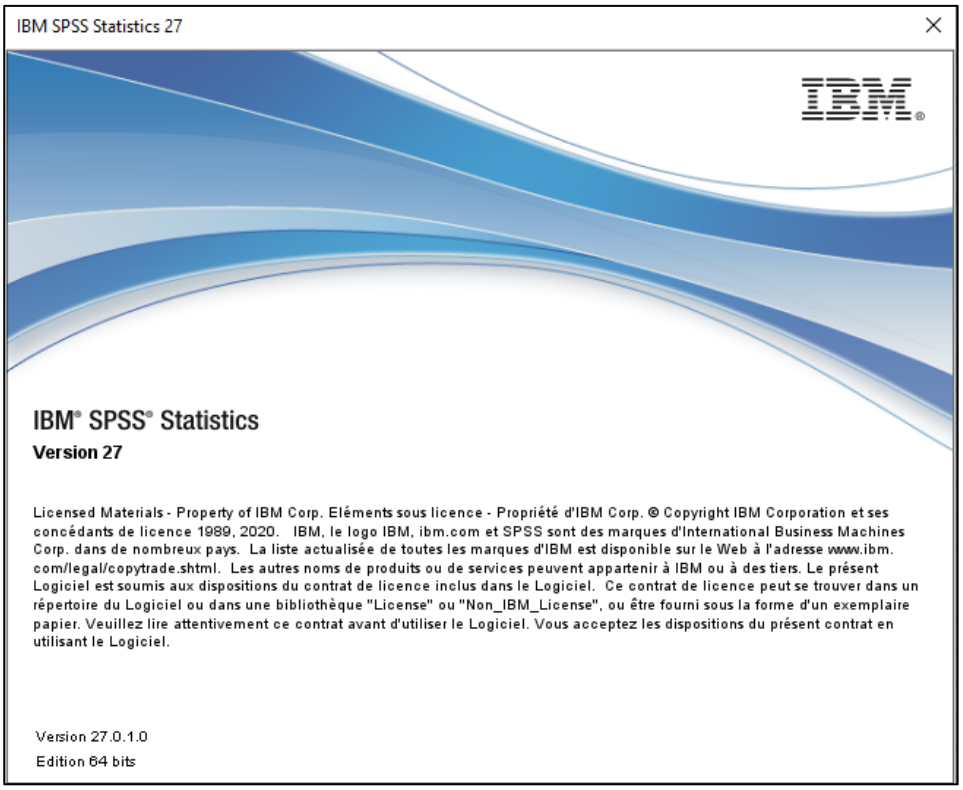
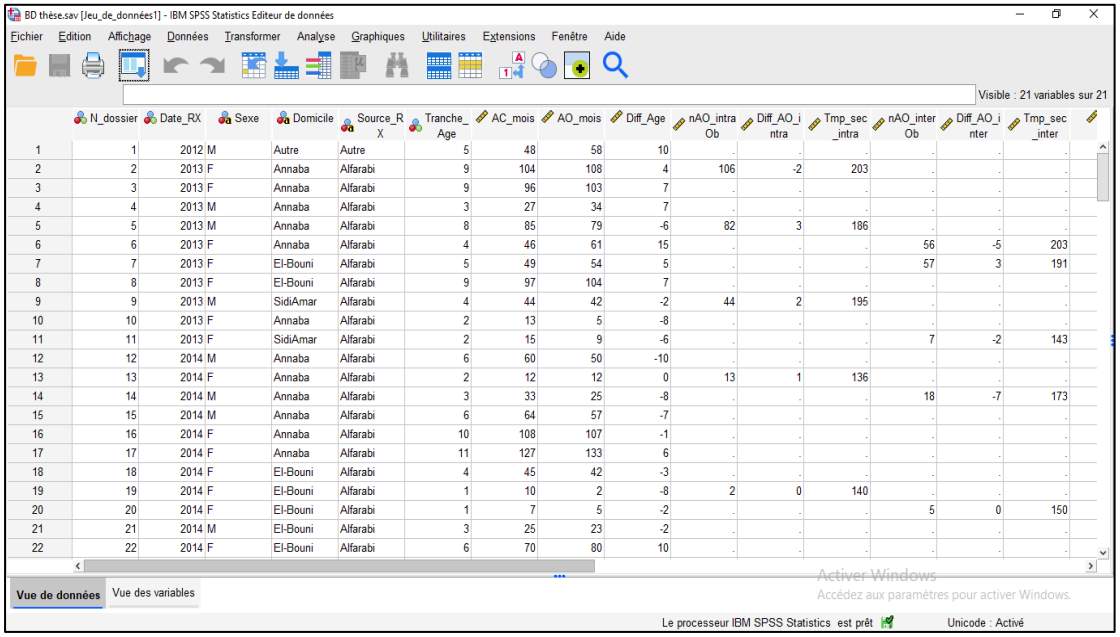


Figure 154 : Le logiciel SPSS et sa version

Après insertion de l'état populationnel sur le SPSS, l'analyse statistique des données se fera selon la nature des variables contenues dans cet état : le sexe, l'âge civil (AC), l'âge osseux (AO), l'IMC et le SSE.

Le fichier obtenu compte au total, 21 variables et 138 sujets, soit une matrice de **2898 données**.



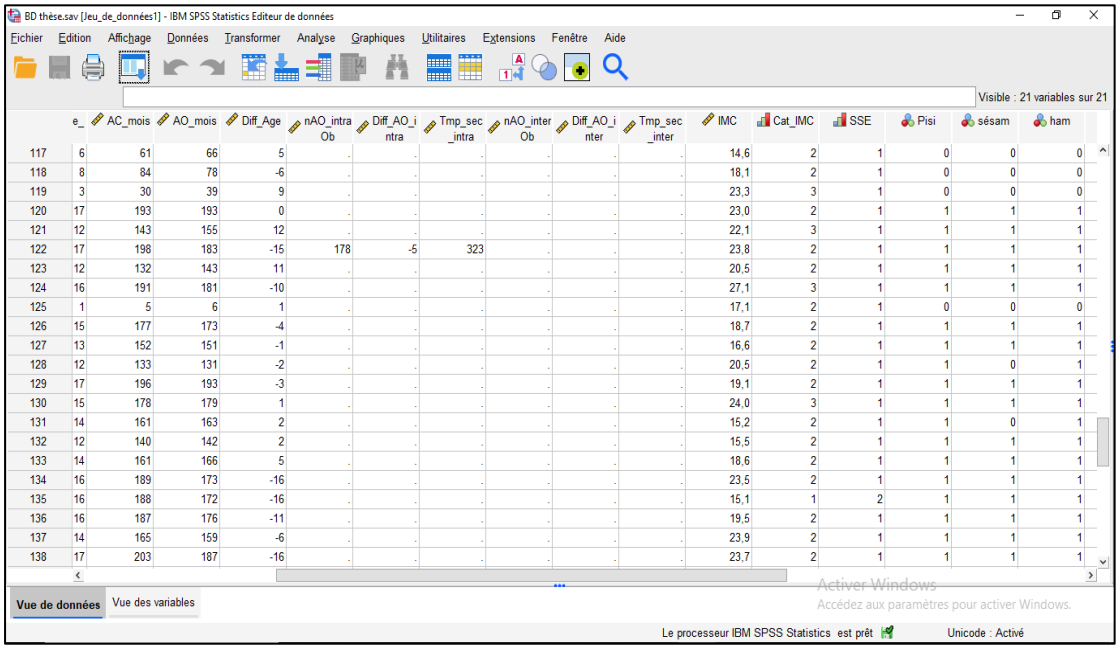


Figure 155 : Capture sur la base des données de l'étude sur le logiciel SPSS

N.B. : quelques représentations graphiques ont été faites, par nécessité, sur l'Excel.



Figure 156 : Le logiciel Windows Office Excel

B. Les opérations statistiques :

Dans le cadre d'analyse statistique, le programme SPSS va nous permettre de réaliser plusieurs opérations mathématiques sur notre échantillon.

Tous les traitements statistiques mentionnés dans ce travail ont été réalisés par ce logiciel : il nous a permis d'effectuer les calculs des effectifs, des pourcentages, des fréquences, des moyennes et des écarts-types ; de procéder à des tests de corrélations, et à des tests de comparaison des moyennes et de pourcentages, le Khi-deux et le Student (t).

La valeur « p », calculée lors d'un test statistique, restera l'un des principaux outils fréquemment utilisés pour décider si un résultat d'une analyse est statistiquement significatif : elle nous indique si les résultats obtenus dans l'échantillon, sont réels et significatifs pour l'ensemble de la population ou non. Le seuil de signification pour tous les tests de notre étude, un $p < 0,05$ est considéré comme significatif.

a. Les calculs statistiques

Les calculs statistiques concernent :

- Les effectifs (les répartitions) ;
- Les pourcentages ;
- Les fréquences ;
- Les moyennes ;
- Les ET ou les DS, qui reflètent la variabilité de la maturation squelettique.

b. Les corrélations

Les corrélations sont utilisées pour voir la relation AO-AC, AO-IMC, AO-SSE.

Elles sont recherchées en utilisant la « régression linéaire », et en déterminant le coefficient de corrélation « r ».

c. Les tests statistiques

Les tests statistiques sont nombreux, ils permettent la vérification des distributions et la « comparaison » entre les variables et les observateurs. Ce sont :

- Le test de normalité d'une distribution :

  Il est représenté par deux paramètres, le coefficient de l'Asymétrie et le coefficient de l'Aplatissement (kurtosis), qui permettent de vérifier si une distribution d'un échantillon suit la loi normale (de Gauss), de donner l'aspect de cette distribution (symétrique, étalée à droite ou à gauche ; aplatie ou rétrécie) et de tracer la courbe gaussienne sur un histogramme.

  Cette normalité est vérifiée aussi par le test de Kolmogorov-Smirnov.

- Le test « Khi carré » ou « Khi 2 », symbolisé en « χ^2 » (chi carré) :

  Ce test statistique permet la comparaison des pourcentages et la vérification de la relation d'indépendance ou d'influence entre deux variables qualitatives nominales, les catégories d'IMC et les groupes du SSE, par exemple.

- Le test de Student (t-test) :

  C'est un test statistique de comparaison de moyennes, très utilisé pour comparer les données quantitatives, à la recherche d'une différence significative ou d'une similarité significative entre les moyennes.

  Ce test vérifie l'hypothèse d'égalité des moyennes, dans le but de vérifier le degré de la similarité de deux mesures. Il compare par exemple la moyenne de l'AO avec celle de l'AC, ou encore la moyenne des âges osseux, les nouveaux et les anciens, du même échantillon, dans le cadre de la variabilité inter- et intra-observateur (il évalue les différences de mesures obtenues lors de la répétition de mesures par le même observateur ou par deux observateurs différents).

- Le test ANOVA :

  Ce test est une méthode d'analyse statistique bivariée, qui consiste à croiser deux variables de nature différente, l'une quantitative et l'autre qualitative. Son but est de rechercher la relation de dépendance ou d'indépendance entre ces deux variables.

  Il permet par exemple de savoir s'il existe des différences significatives de la maturation squelettique entre les différentes catégories IMC ou entre les différents groupes SSE.

(7) LE RANGEMENT ET L'IDENTIFICATION DES DOSSIERS

Le dernier point dans le volet « Matériel », est le « rangement et identification des dossiers ».
Pour notre étude, ce point ne peut être négligé, puisque cela relève de l'organisation générale de la partie pratique.
Un enfant ou un adolescent, de point de vue méthodologique dans les recherches transversales, est un « Dossier », car on le recrute pour informations, mesures et radiographie, puis on « perd » le contact « physique » avec lui.
Ce qu'on garde alors est un ensemble de « pièces » en papier et en plastique, qui racontent, de façon cryptée, l'état de maturation squelettique de chaque enfant et adolescent.
Les pièces de chacun des enfants ou des adolescents, sont rassemblées sous forme d'un « dossier », en partie électronique sur PC, mais en totalité dans une « pochette », une enveloppe en papier, qui se rangent aisément, sans prendre trop de place.
Cette pochette est nominative, sur laquelle sont inscrit le Nom et le Prénom de l'enfant ou de l'adolescent, et son Numéro (de l'enfant ou du dossier). Ce dernier, le Numéro, est composé d'un chiffre en série et l'année de la prise de la radiographie, les deux séparés par un slash (barre oblique), comme par exemple : 015/2021.
A l'intérieur du dossier, sont classées les cinq pièces déjà préparées :

- La fiche de renseignements ;
- Le cliché radiographique ;
- Le compte rendu de maturation squelettique n° 1 (délivré par Maturos) ;
- Le compte rendu de maturation squelettique n° 2 (délivré par Maturos).
- La courbe personnalisée de l'IMC

Les « Dossiers », par ce contenu, sont la véritable source des données scientifiques incontournables pour notre étude, prête à être exploitée.
De cette manière, tous les dossiers sont rangés, organisés, accessibles et facilement consultables.

FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Réf. Cliché : n° 002 **/ année** 2013

Date de la prise du cliché radiographique : 26/11/2013

Nom : A

Prénom : Rahaf

Sexe : F

Date et lieu de naissance : 8/04/2005

Age civil (années, mois, jours) **:** 8 ans, 7 mois, 18 jours

Domicile actuel (commune, quartier) **:** Sidi Achour, Annaba

Scolarité : 3ème année Primaire

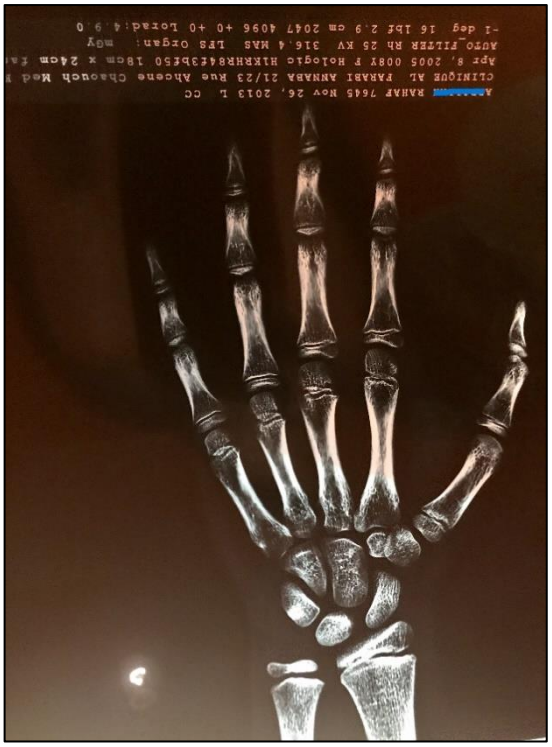
Poids (en kg) **:** 26,4 K

Taille (en cm) **:** 123,5 cm

Statut socio-économique :

- **Niveau d'étude des parents :** universitaire
- **Profession des parents :** père Médecin, Mère néant
- **Nombre d'enfants :** 4
- **Equipements et accessoires de l'habitat :**
  (eau, électricité, gaz de ville, TV, téléphone, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur, voiture, PC, tablette, internet)

TOUT



MATUROS 4.0 / 20-12-2013 21h16:10

Rahaf née le 08/04/2005

RESULTATS de l'évaluation de la MATURATION SQUELETTIQUE

Date de la radiographie : 19/12/2013

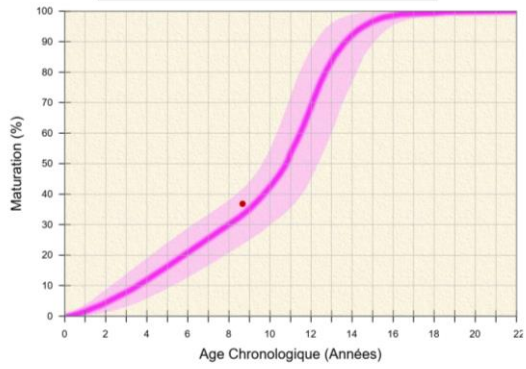
Age chronologique : 8 an(s) et 8 mois (104 Mois)

MATURATION SQUELETTIQUE : 36.9%

Equivalent "âge osseux" 9 an(s) et 0 mois (108 Mois)

Maturation Os courts : 35.4%
Maturation Os longs : 38.4%
Ecart Réduit : 0.7

Situation par rapport à la moyenne ± 2 écart types



Antécédents :

Commentaires :

MATUROS 4.0 / 20-12-2013 21h17:34

MATURATION SQUELETTIQUE

Rahaf A née le 08/04/2005

Examen n°1

Examinateur ABDALLAH Abdeldjalil (Analyse Complète)
Date de la radiographie : 19/12/2013
Age chronologique : 8 an(s) et 8 mois (104 Mois)
Maturation Squelettique : 36.9%
Age squelettique :9 an(s) et 0 mois (108 Mois)
Maturation Os courts : 35.4%
Maturation Os longs : 38.4%
Ecart Réduit : 0.7

Nom	Lettre	Note
Grand os	K	20
Os crochu	K	25
Pyramidal	K	30
Pisiforme	Q	2
Semi lunaire	L	25
Scaphoide	L	25
Trapèze	L	25
Trapézoide	L	25
Note Os courts		**177**
Epiphyse distale du Radius	K	60
Epiphyse distale du Cubitus	M	25
Epiphyse proximale du premier métacarpien	L	20
Epiphyse proximale de la première phalange du pouce	M	10
Premier Sésamoide du pouce	O	0
Epiphyse proximale de la seconde phalange du pouce	L	20
Epiphyse distale du troisième métacarpien	M	7
Epiphyse distale du Cinquième métacarpien	M	7
Epiphyse proximale de la première phalange du médius	L	10
Epiphyse proximale de la première phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la seconde phalange du médius	N	5
Epiphyse proximale de la seconde phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la troisième phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la troisième Phalange de l'auriculaire	M	7
Note Os longs		**192**
Note Totale		**369**

Page N°1

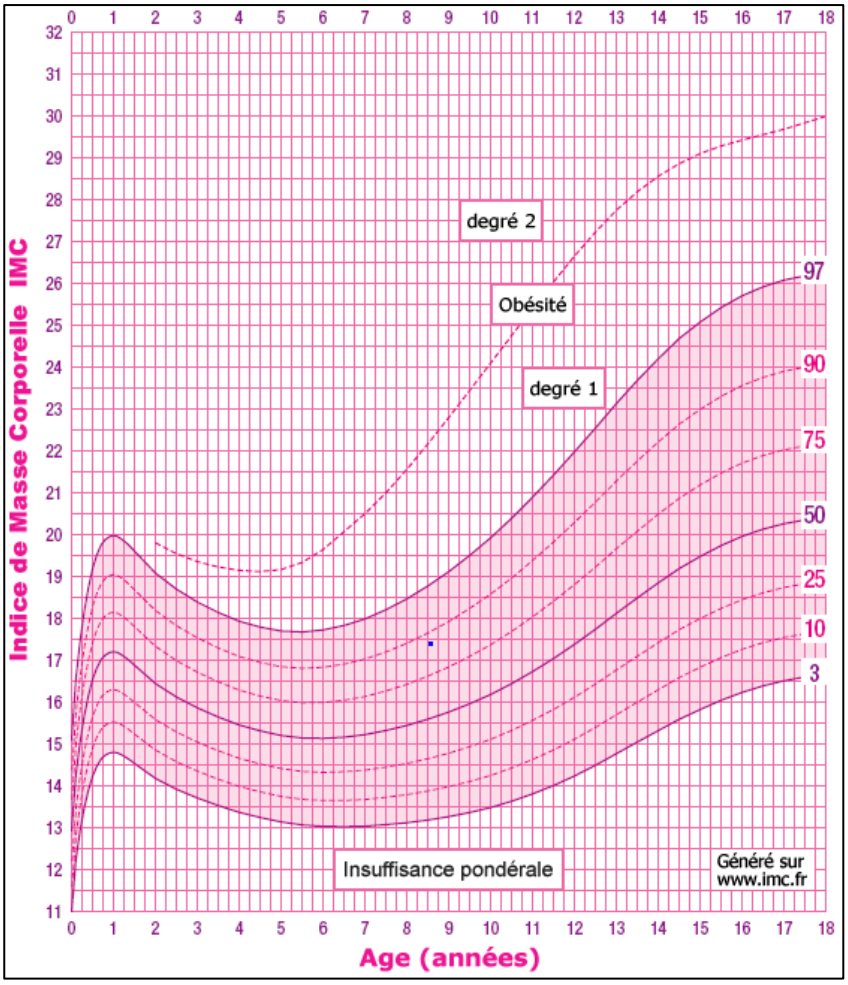


Figure 157 : Les 5 pièces contenues dans le Dossier de chaque enfant et adolescent de l'échantillon

I. 2. Le volet « Méthodes »

Le volet « Méthodes » va tenter l'exploitation quasi-complète des données de lecture des clichés radiographiques, des mesures anthropométriques et des données socio-économiques pour étudier la maturation squelettique chez les enfants et les adolescents de la population cible d'une part, et ses rapport avec les données auxologiques et socio-économiques d'autre part.

Jusqu'à cette étape, tout un parcours de travail a été traversé : le recrutement des sujets de l'échantillon, la récolte de leurs informations, la prise d'un cliché radiographique pour chacun, la lecture de la radiographie, le calcul de l'IMC pour chacun, le dépouillement, le regroupement, le classement, etc… et bien d'autres tâches.

Le guide qui nous permettra d'arriver à des résultats exploitables de notre étude réside dans les « Méthodes ».

Ce second volet, sera traité selon le plan suivant :

(1) Le type de l'étude
(2) La présentation de la population
(3) L'applicabilité de la méthode de Sempé
(4) L'évolution de la maturation squelettique
(5) Les corrélations de l'âge osseux

(1) LE TYPE DE L'ÉTUDE

L'étude présente est prospective, de type transversal analytique

- Elle est **prospective**, car elle a visé le moment du recrutement des sujets et de la collecte de leurs données.

  Dans les études prospectives, la population et toutes ses données ne se rapportent pas à une période antérieure, comme dans les études rétrospective. Notre population est nouvellement recrutée quand l'étude a débutée, et ses données sont recueillies au début de ce recrutement, sujet par sujet.

  Notre étude a débuté la première fois, alors, par un recrutement des sujets, en leur collectant leurs données personnelles et anthropométriques, et en leur faisant des radiographies standards du poignet et de la main gauches. Le recrutement s'est déroulé à des périodes différentes, depuis 2012 jusqu'au 2024.

- Elle est **transversale**, parce qu'elle a été réalisée à partir d'investigations uniques prises à une date donnée sur des individus d'âge et de sexe différents, à raison d'une investigation par individu.

  Dans les études transversales, il n'y a pas de suivi des individus, et donc ne permettent pas d'observer précisément les changements qui interviennent dans les processus de croissance, comme dans les études longitudinales.

  Ces études transversales sont relativement faciles à mener et utiles pour donner l'état « statique » et « statistique » d'un groupe d'individus, à un moment donné, relativement à la chose observée, ici est la maturation squelettique ; elles permettent d'estimer la tendance d'une population et les variations de données de croissance à chaque âge, pour chaque sexe.

  L'étude transversale est adéquate pour l'établissement des normes et pour les comparaisons entre les populations ou au sein d'une même population d'une époque à l'autre en termes d'évolution séculaire.

  Dans ce type d'études, les erreurs normalisées (standards) y sont relativement petites.

  Notre étude s'est basée sur des investigations uniques pour chaque enfant et adolescent de la population, à base d'un seul cliché radiographique et une seule prise de mesures anthropométriques, sans qu'il y aura un suivi de ces sujets ou une deuxième prise de clichés radiographiques, ni des mesures anthropométriques. Notre étude est « instantanée » certes, mais par la diversité des âges (civils) chez les deux sexes, nous avons essayé de couvrir toutes les tranches d'âge dans lesquelles la maturation osseuse est en pleine activité, afin de ne pas manquer les détails de l'évolution maturative du poignet et de la main qui apparaissent dans chaque année de développement.

- Elle est **analytique**, puisqu'elle permet la mise en évidence et l'analyse des relations qui existent entre les différents paramètres qui définissent le thème de recherche.

  Ces études analytiques permettent d'évaluer les paramètres investigués et d'établir les liens probables qui peuvent exister entre eux, et non de décrire uniquement le thème de recherche, comme pour les études descriptives.

  Notre étude va mettre en évidence et analyser les relations qui existent entre la maturation squelettique et plusieurs paramètres, tels ceux de la croissance (taille, poids et IMC), le SSE, l'âge civil, etc...

Les outils privilégiés pour mener une **étude prospective, de type transversal analytique** [7, 18, 49, 99, 106, 135, 137] sont les enquêtes qui sont des observations organisées dans une population appropriée d'une taille suffisante. Des enquêtes pareilles exigent des questionnaires bien conçus qui collecte un bon taux d'informations et dont les résultats sont présentés sous forme de mesures de relations entre différents paramètres.

(2) LA PRESENTATION DE LA POPULATION

Notre étude s'est basée sur un échantillonnage **aléatoire**, elle a recruté des sujets selon des critères d'inclusion bien précis et elle a recalé d'autres selon aussi des critères d'exclusion bien précis, sans que ce recrutement ou ce renvoie soient orientés selon une tendance socio-économique, ethnique, géographique ou autres… le principe était d'obtenir des résultats « réels » et « expressifs », non « orientés », ni « influencés ».

A. L'échantillon et l'erreur :

Il existe en épidémiologie, deux grands types d'erreur qui accompagnent la création ou les résultats d'un échantillon [18] :

(1) <u>L'erreur aléatoire :</u>

Qui est l'écart qui existe entre une valeur observée et la valeur vraie dans la population du seul fait du hasard. Cette erreur est réduite en augmentant la taille de l'échantillon étudié et en améliorant la fiabilité de la méthode de mesure.

Les erreurs aléatoires ne peuvent jamais être entièrement éliminées puisqu'on étudie un échantillon « limité » de la population.

Il existe trois sources principales d'erreur aléatoire :

- les variations biologiques individuelles, qui existe toujours et aucune mesure n'est parfaitement capable de les cerner ;
- les erreurs d'échantillonnage, qui sont en rapport avec un petit échantillon qui n'est pas représentatif de l'ensemble des variables d'une population. La meilleure façon de réduire les erreurs d'échantillonnage consiste à augmenter la taille de l'échantillon ;
- les erreurs de mesure, qui peuvent se réduire par application des protocoles stricts et par des mesures individuelles aussi précises que possible.

(2) <u>L'erreur systématique (ou biais) :</u>

Qui fait écarter systématiquement les résultats des valeurs vraies.

Dans une étude où l'erreur systématique est faible, on dit que l'exactitude est grande. L'exactitude ne dépend pas de la taille de l'échantillon.

Les principales sources d'erreur systématique sont :

- le biais de sélection (ou de recrutement), qui correspond à une situation dans laquelle les participants à l'étude diffèrent systématiquement de ceux qui n'y participent pas. On peut réduire ce biais en explicitant clairement les critères de recrutement (critères d'inclusion et d'exclusion) dans l'étude ;
- le biais de mesure (ou de classification), qui correspond à une erreur systématique de mesure ou de classification des participants à

l'étude. On peut le diminuer grâce à une bonne conception de l'étude.

Concernant notre échantillon, ses éventuelles erreurs, qu'elles soient aléatoires ou systématiques, ont été minimisées au maximum par la conception préalable de l'étude, avec des protocoles tracés et des différents critères préparés, et par la collecte des données qui a été faite avec le plus grand soin.

Dans ce cadre, plusieurs procédures ont été respectées :

- la taille de l'échantillon a été étudiée, calculée et réalisée pour avoir un échantillon représentatif, avec moins d'erreurs statistiques ;
- la lecture de l'AO sur le Maturos a été faite avec une très grande précaution et précision ;
- les mesures anthropométriques et le calcul de l'IMC ont été conduit avec précision ;
- les critères d'inclusion et d'exclusion de l'échantillon et les critères de qualité pour la prise des clichés radiographiques ont été bien tracés auparavant et strictement appliqués ;
- les critères de classement des catégories de l'IMC et des groupes du SSE ont été préparés au préalable, puis conduit correctement.

B. La population d'étude :

Notre étude s'est basée sur un échantillon de **138 enfants et adolescents**, des deux sexes, qui habitent la wilaya d'Annaba et qui appartiennent à des familles à statut socio-économique (SSE) moyen à aisé.

(1) La taille de l'échantillon :

Afin de définir et argumenter la taille de l'échantillon, cette dernière a été calculer par des « tables donnant la taille minimale d'un échantillon », adoptées par l'OMS, pour un niveau de confiance de 95% [104] : la taille de l'échantillon doit être égale à **119** (tab. 48 bis).

Tableau 48 bis : La table de la taille minimale d'un échantillon, pour un niveau de confiance de 95%

a) Niveau de confiance: **95%**

d \ P	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
0,01	1825	3457	4898	6147	7203	8067	8740	9220	9508	9604	9508	9220	8740	8067	7203	6147	4898	3457	1825
0,02	456	864	1225	1537	1801	2017	2185	2305	2377	2401	2377	2305	2185	2017	1801	1537	1225	864	456
0,03	203	384	544	683	800	896	971	1024	1056	1067	1056	1024	971	896	800	683	544	384	203
0,04	114	216	306	384	450	504	546	576	594	600	594	576	546	504	450	384	306	216	114
0,05	73	138	196	246	288	323	350	369	380	384	380	369	350	323	288	246	196	138	73
0,06	51	96	136	171	200	224	243	256	264	267	264	256	243	224	200	171	136	96	51
0,07	37	71	100	125	147	165	178	188	194	196	194	188	178	165	147	125	100	71	37
0,08	29	54	77	96	113	126	137	144	149	150	149	144	137	126	113	96	77	54	29
0,09	23	42	60	76	89	100	108	114	117	119	117	114	108	100	89	76	60	42	23
0,10	18	35	49	61	72	81	87	92	95	96	95	92	87	81	72	61	49	35	18
0,11	15	29	40	51	60	67	72	76	79	79	79	76	72	67	60	51	40	29	15
0,12	13	24	34	43	50	56	61	64	66	67	66	64	61	56	50	43	34	24	13
0,13	11	20	29	36	43	48	52	55	56	57	56	55	52	48	43	36	29	20	11
0,14	9	18	25	31	37	41	45	47	49	49	49	47	45	41	37	31	25	18	9
0,15	8	15	22	27	32	36	39	41	42	43	42	41	39	36	32	27	22	15	8
0,20	5	9	12	15	18	20	22	23	24	24	24	23	22	20	18	15	12	9	5
0,25	*	6	8	10	12	13	14	15	15	15	15	15	14	13	12	10	8	6	*

(2) <u>La formule :</u>

Bien que la définition d'une taille d'échantillon soit assez facile par des tables pareilles, le calcul obéit à une formule mathématique connue [8, 104]:

$$n = \frac{t^2 \times p(1-p)}{e^2}$$

Où :

- **n** : est la taille de l'échantillon attendu ;
- **t** : est le niveau de confiance déduit du taux de confiance (traditionnellement 1,96 pour un taux de confiance de 95 %) ;
- **p** : est la proportion estimative de la population présentant la caractéristique étudiée dans l'étude. Lorsque cette proportion est ignorée, le p = 0,5 sera retenue par défaut. C'est en effet la valeur la plus « sûre » puisque la taille de l'échantillon nécessaire est maximale pour P = 0,5 ;
- **e** : (ou « d » dans quelques formules) est la marge d'erreur (traditionnellement fixée à 5 % ou même 10 %), dans notre étude est de 9 %.

(3) <u>L'interprétation de la valeur « 119 » :</u>

En se basant sur la formule précédente, on peut interpréter la valeur de la taille de l'échantillon déterminée par les tables de l'OMS, comme suit :

- Il faut recruter 119 personnes pour être sûr, à 95 %, des résultats, avec une erreur maximale (degré de précision) de 9 % ;
- Autrement dit, il y a 95 % de chances qu'en recrutant 119 personnes dont 50 % de l'échantillon correspondent aux standards de Sempé que le % de correspondance « positive » dans la population mère se situe entre 41 et 59 % (c.-à-d. 50 % **± 9** %) ;
- C.-à-d. que les résultats de l'échantillon comparés à ceux de la population mère seront précis à + ou – 9 %, dans 95 % des cas.

(4) <u>Correction de l'erreur inhérente à la taille :</u>

En tenant compte de l'hypothèse additionnelle que les données d'environ 10 % des sujets (soit 12) seront inexploitables, nous sommes amenés à recruter un effectif global de **≥ 131**

Au total, et pour tous les arguments déjà cités, la taille de l'échantillon était **supérieure à 131**, exactement **138.**

C. La méthode d'étude de la population :

La population d'étude se décline à partir des informations générales qui figurent dans la « Fiche de renseignements » de chaque enfant et adolescent.

Le saisie des sujets de notre population d'étude dans une liste nominative et exhaustive, a été fait (voir : volet « Matériel »). Sur cette liste, figurent les informations générales déjà recueillies.

La présentation de la population abordera ainsi, ses répartitions par rapport aux variables qui sont les « informations générales » de la population : (1) le nombre d'enfants et d'adolescents qui compose l'échantillon ; (2) le partage de l'échantillon en plusieurs tranches d'âge, et la particularité de chaque tranche ; (3) la répartition par rapport aux communes et aux années de recrutement ; tout en distinguant la part des filles et des garçons dans ces répartitions.

La langue de cette présentation est celle des chiffres et des pourcentages, et sa forme est celle des tableaux et des graphes.

La valeur de l'âge en deux chiffres, en « année » et en « mois », qui figure sur la liste nominative de l'échantillon n'est pas statistiquement pratique, pour avoir un seul chiffre, la valeur de l'âge doit être convertie en « mois ».

Le seuil de signification pour tous les tests de notre étude est fixé à un $p < 0,05$.

En ci-après, sont exposés les différents titres et calculs à développer bientôt, en nombre et en pourcentage, dans le chapitre « Résultats » :

1. L'effectif par sexe ;
2. La moyenne d'âge, par échantillon et par sexe, avec ET ;
3. Les tranches d'âge (civil), par sexe ;
4. La répartition de l'échantillon par commune et par sexe ;
5. La répartition de l'échantillon par année de recrutement (date de la prise du cliché radiographique) et par sexe ;
6. La répartition de l'échantillon par origine des clichés radiographiques et par sexe.

(3) L'APPLICABILITE DE LA METHODE DE SEMPÉ

Le premier objectif de cette étude est de « vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé adoptée par cette étude et appliquée sur une population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens », et dans l'optique de cet objectif, cette deuxième partie de « Méthodes » est tracée.

La fiabilité de la méthode d'évaluation de la maturation squelettique du Professeur Michel SEMPÉ atteste la validité de la méthode appliquée à notre échantillon et témoigne par conséquent, son applicabilité sur une population algérienne contemporaine d'enfant et d'adolescents.

Pour cela, s'alignent devant nous plusieurs méthodes, aidées par des opérations statistiques, qui concourent ensemble à vérifier cette fiabilité.

Tout commence en estimant l'âge osseux (AO) en fonction de l'âge civil (AC) : par la détermination du taux de la maturation squelettique et l'estimation de l'âge osseux par la méthode de Sempé (Logiciel Maturos®) de chaque enfant et adolescent de notre échantillon (déjà faite, voir : volet « Matériel »), une fois cette étape est achevée, on passe à d'autres étapes dans le même fil d'intérêt, qui sont :

- La description de la relation : AO / AC :
  C'est-à-dire, est-ce que l'AO de l'enfant est proche de son AC ?
  Cette relation est cherchée par deux moyens, la « comparaison » et la « corrélation » :
  - La comparaison : le calcul de la différence AO-AC ; plus les âges sont proches, plus la différence est petite et plus la méthode appliquée est fiable (test de fiabilité : AO – AC = 0) ;
  - La corrélation : le calcul de la corrélation AO et AC ; plus les âges sont proches, plus la corrélation est forte et plus la méthode appliquée est fiable.
- Le calcul de la variation intra-observateur et inter-observateur :
  La variabilité individuelle lors de la lecture des clichés radiographiques est un élément en faveur ou en défaveur de la méthode appliquée, cette variabilité est testée statistiquement.
  Une double lecture de l'AO de 20 % des clichés radiographiques de l'échantillon a été effectuée par le premier et le même observateur, à deux dates différées, pour le calcul de la variabilité intra-observateur.
  Une double lecture de l'AO de 10 % des clichés radiographiques de l'échantillon a été effectuée par un deuxième observateur pour le calcul de la variabilité inter-observateur.
  Ce calcul va tester la « répétabilité », qui désigne la variabilité intra-observateur, et la « reproductibilité », qui désigne la variabilité inter-observateur.

De faibles variations intra-observateur et inter-observateur, quel que soit le degré d'expérience des observateurs, témoignent aussi de la précision et la fiabilité de la méthode appliquée.

- Le calcul du temps de lecture :

  La lecture de l'AO « consomme » du temps. Nous allons utiliser un chronomètre pendant la lecture de l'AO sur quelques clichés radiographiques. Plus la durée de lecture est courte, plus la méthode appliquée est fiable.

Pour calculer **la variabilité intra-observateur**, c'est-à-dire celle du même lecteur (moi-même), nous avons refait la lecture sur le Maturos de 20 % des clichés radiographiques, soit 26 clichés, 13 filles et 13 garçons, choisis d'une manière aléatoire. La re-lecture va noter deux choses :

a. Le « nouvel » âge osseux (AOn1), pour le comparer avec l' « ancien » âge osseux (AOa) ;
b. La durée de lecture de chaque cliché.

Nous avons obtenus les résultats suivants :

Tableau 49 : Les résultats de la re-lecture des clichés radiographiques (âges osseux et durées de lecture) dans le cadre de la recherche de la variabilité intra-observateur

Nom et **prénom**	**N° Dossier**	**Sexe** (M, F)	**Age civil** (AC)	**Ancien âge osseux** (AOa)	**Nouvel âge osseux** (AOn1)	**Durée de lecture**
A. Rahaf	002/2013	F	8 ans, 8 mois (104 mois)	9 ans (108 mois)	8 ans, 10 mois (106 mois)	3 min 23 sec
S. Mosaab	005/2013	M	7 ans, 1 mois (85 mois)	6 ans, 7 mois (79 mois)	6 ans, 10 mois (82 mois)	3 min 06 sec
K. Ouassim	009/2013	M	3 ans, 8 mois (44 mois)	3 ans, 6 mois (42 mois)	3 ans, 8 mois (44 mois)	3 min 15 sec
B. Alae	013/2014	F	1 an (12 mois)	1 an (12 mois)	1 an, 1 mois (13 mois)	2 min 16 sec
D. Aroua	019/2014	F	10 mois	2 mois	2 mois	2 min 20 sec
D. Raed Salah	023/2014	M	2 ans, 6 mois (30 mois)	3 ans, 3 mois (39 mois)	3 ans, 6 mois (42 mois)	3 min 05 sec
M. Chouaib	030/2014	M	13 ans, 8 mois (164 mois)	13 ans, 3 mois (159 mois)	13 ans, 4 mois (160 mois)	3 min 42 sec
G. Aroua	038/2014	F	2 ans, 3 mois (27 mois)	2 ans, 6 mois (30 mois)	2 ans, 6 mois (30 mois)	3 min 17 sec
B. Abir	041/2014	F	11 ans, 11 mois (143 mois)	10 ans, 9 mois (129 mois)	11 ans (132 mois)	3 min 55 sec
B. Anes	043/2014	M	4 ans, 6 mois (54 mois)	5 ans, 10 mois (70 mois)	6 ans, 3 mois (75 mois)	3 min
S. Malek	046/2014	F	10 ans, 1 mois (121 mois)	10 ans, 7 mois (127 mois)	10 ans, 2 mois (122 mois)	4 min 04 sec
L. Rami	057/2014	M	7 ans, 10 mois (94 mois)	8 ans, 1 mois (97 mois)	8 ans, 4 mois (100 mois)	4 min 04 sec
M. Ismahène	060/2014	F	2 ans, 1 mois (25 mois)	1 an, 5 mois (17 mois)	1 an, 4 mois (16 mois)	2 min 32 sec

O Rawen	072/2014	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	3 ans, 11 mois (47 mois)	3 ans, 7 mois (43 mois)	3 min 02 sec
A. Mouatez	076/2014	M	3 ans, 1 mois (37 mois)	2 ans, 11 mois (35 mois)	3 ans, 4 mois (40 mois)	2 min 37 sec
T. Abderrahim	077/2014	M	4 ans, 7 mois (55 mois)	4 ans, 5 mois (53 mois)	4 ans, 3 mois (51 mois)	4 min 07 sec
B. Belkis	083/2014	F	2 ans, 5 mois (29 mois)	2 ans, 4 mois (28 mois)	2 ans, 9 mois (33 mois)	3 min 02 sec
B. Nadjmeddine	087/2014	M	1 an (12 mois)	1 an, 1 mois (13 mois)	1 an, 5 mois (17 mois)	2 min 51 sec
N. Mohamed Aymen	092/2014	M	1 an (12 mois)	1 an, 5 mois (17 mois)	1 an, 11 mois (23 mois)	2 min
B. Fouad	099/2015	M	7 mois	5 mois	9 mois	2 min 52 sec
H. Zaineb	103/2015	F	7 ans, 11 mois (95 mois)	8 ans, 5 mois (101 mois)	8 ans, 6 mois (102 mois)	3 min 56 sec
A. Bouthaina	108/2015	F	14 ans, 1 mois (169 mois)	12 ans, 9 mois (153 mois)	12 ans, 7 mois (151 mois)	3 min 06 sec
M. Karima	110/2015	F	11 ans, 6 mois (138 mois)	11 ans, 8 mois (140 mois)	11 ans, 10 mois (142 mois)	4 min 19 sec
S. Mohamed Zine	114/2015	M	10 ans, 10 mois (130 mois)	11 ans, 11 mois (143 mois)	12 ans (144 mois)	3 min 25 sec
L. Abdelmoumen	115/2015	M	1 an (12 mois)	6 mois	5 mois	3 min 39 sec
A. Ranim	122/2023	F	16 ans, 6 mois (198 mois)	15 ans, 3 mois (183 mois)	14 ans, 10 mois (178 mois)	5 min 23 sec

D'un autre côté, pour calculer **la variabilité inter-observateur**, c'est-à-dire celle d'un autre observateur (ou lecteur), nous avons refait la lecture sur le Maturos de 10 % des clichés radiographiques, soit 14 clichés, 7 filles et 7 garçons, choisis d'une manière aléatoire.

Deux lecteurs (observateurs) ont été volontaires pour procéder à cette re-lecture, il s'agit ici de Dr. SOUSSA Chahrazed, maître-assistante en Anatomie Normale et spécialiste en Imagerie Médicale, et Dr. BELHOUCHET Samia, maître-assistante en Anatomie Normale et spécialiste en Imagerie Médicale.

Notant que ces deux lecteurs n'ont reçu aucun entraînement préalable sur le Maturos, ni sur place, ni avant, mise à part une présentation rapide concernant les touches du logiciel pour défiler la lecture.

La re-lecture va noter deux choses :

a. Le « nouvel » âge osseux (AOn2), pour le comparer avec l' « ancien » âge osseux (AOa);
b. La durée de lecture de chaque cliché.

Nous avons obtenus les résultats suivants :

Tableau 50 : Les résultats de la re-lecture des clichés radiographiques (âges osseux et durées de lecture) dans le cadre de la recherche de la variabilité inter-observateur

Nom et **prénom**	**N° Dossier**	**Sexe** (M, F)	**Age civil** (AC)	**Ancien âge osseux** (AOa)	**Nouvel âge osseux** (AOn2)	**Durée de lecture**
S. Tesnim	006/2013	F	3 ans, 10 mois (46 mois)	5 ans, 1 mois (61 mois)	4 ans, 8 mois (56 Mois)	3 min 23 sec
K. Malek	007/2013	F	4 ans, 1 mois (49 mois)	4 ans, 6 mois (54 mois)	4 ans, 9 mois (57 Mois)	3 min 11 sec
R. Djoumana	011/2013	F	1 an, 3 mois (15 mois)	9 mois	7 mois	2 min 23 sec
B. Ibrahim Anes	014/2014	M	2 ans, 9 mois (33 mois)	2 ans, 1 mois (25 mois)	1 an, 6 mois (18 mois)	2 min 53 sec
D. Razane	020/2014	F	7 mois	5 mois	5 mois	2 min 30 sec
L. Fatima	024/2014	F	2 ans, 8 mois (32 mois)	3 ans, 3 mois (39 mois)	2 ans, 11 mois (35 mois)	3 min 23 sec
B. Ghofrane	027/2014	F	10 ans, 8 mois (128 mois)	10 ans, 2 mois (122 mois)	9 ans, 1 mois (109 mois)	3 min 39 sec
B. Selmane	028/2014	M	4 ans, 5 mois (53 mois)	3 ans, 7 mois (43 mois)	3 ans, 1 mois (37 mois)	4 min 3 sec
M. Mohamed Raouf	029/2014	M	6 ans, 11 mois (83 mois)	8 ans, 3 mois (99 mois)	9 ans, 1 mois (109 mois)	3 min 16 sec
B. Ayoub	032/2014	M	5 ans, 5 mois (65 mois)	5 ans, 10 mois (70 mois)	5 ans, 11 mois (71 mois)	3 min
R. Khaled	034/2014	M	7 ans, 2 mois (86 mois)	6 ans, 6 mois (78 mois)	6 ans, 8 mois (80 mois)	3 min 55sec
O. Malek	036/2014	F	6 ans, 7 mois (79 mois)	8 ans, 1 mois (97 mois)	8 ans, 4 mois (100 mois)	3 min 40 sec
B. Abdelali	039/2014	M	10 ans, 3 mois (123 mois)	9 ans, 8 mois (116 mois)	9 ans, 8 mois (116 mois)	3 min 23 sec
B. Raed	044/2014	M	8 mois	11 mois	1 an, 3 mois (15 mois)	2 min 40 sec

En ci-après, les différents titres et calculs qui seront développés dans le chapitre « Résultats » :

- **La relation AO-AC :**
  1. Le test de la normalité de la variable âge osseux.
  2. Le calcul de la différence entre l'âge osseux et l'âge civil (AO – AC), en mois ;
  3. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC, par sexe, avec ET, en utilisant le test-t pour séries appariées ;
  4. Le calcul de la corrélation entre AO et AC, étudiée par régression linéaire, avec le calcul du coefficient de corrélation « r » ; et sur un graphe de dispersion on mesure la droite de régression ;
  5. La répartition de la moyenne de la différence AO-AC par (tranche d'âge) et par sexe, avec ET et valeurs extrêmes ;
  6. La fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC en fonction des tranches d'âge AC.

- **La variabilité intra-observateur :**
  7. Le calcul de la moyenne des nouveaux AO (AOn1) de la re-lecture intra-observateur, par sexe, en calculant ses 2 ET ;
  8. La comparaison des lectures « intra-observateurs » :
     Le calcul de la moyenne de la différence des nouveaux AO (AOn1) et anciens (AOa), par sexe avec ET ; L'évaluation par le test-t de Student.
- **La variabilité inter-observateur :**
  9. Le calcul de la moyenne des nouveaux AO (AOn2) de la re-lecture inter-observateur, par sexe, en calculant ses 2 ET ;
  10. La comparaison des lectures « inter-observateurs » :
      Le calcul de la moyenne de la différence des nouveaux AO (AOn2) et anciens (AOa), par sexe avec ET ; L'évaluation par le test-t de Student.
- **Le calcul du temps de lecture :**
  11. Le calcul de la durée moyenne de lecture des clichés radiographiques dans le cadre de la variabilité intra-observateur, avec ET ;
  12. Le calcul de la durée moyenne de lecture des clichés radiographiques dans le cadre de la variabilité inter-observateur, avec ET.

(4) L'ÉVOLUTION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE

Le deuxième objectif de cette étude est de « suivre l'évolution de la maturation squelettique sur la région du poignet et de la main des enfants et des adolescents de notre échantillon, afin de tracer le schéma d'ossification des indicateurs osseux », et dans l'optique de cet objectif, cette troisième partie de « Méthodes » est tracée.

La maturation squelettique est un processus biologique, objectivée radiologiquement et évaluée anatomiquement sur le squelette du poignet et de main, elle évolue petit à petit, par étape, depuis son début après la naissance jusqu'à sa terminaison à l'âge adulte.

Ce suivi va nous permettre de « faire d'une pierre trois coups » :

1. Tracer le « schéma d'ossification » :

Le schéma d'ossification est une représentation simplifiée et symbolique qui décrit le processus d'ossification, depuis son début jusqu'à sa fin. Il rapporte les dates d'apparition des points d'ossification des indicateurs osseux, et celles de leur terminaison ou de leur fusion.

En effet, les indicateurs osseux du poignet et de la main, durant leur maturation, suivent un tracé d'apparition, de présence et de terminaison, constant, stable et à des intervalles fixes, qu'on peut le reproduire sous forme d'une représentation qui « parle d'elle-même ».

Pour tracer le schéma d'ossification, nous allons procéder comme suit :

a. Noter l'image fixe (état) de l'indicateur osseux sur le cliché radiographique, on peut utiliser pour cela le compte-rendu n°2 du Maturos où figurent un relevé détaillé des stades maturatifs des indicateurs osseux ainsi que leur notation ;
b. Rapporter cet « état » sur un tableau où figurent les indicateurs osseux (sur les colonnes) et les tranches d'âges (sur les lignes) ;
c. Faire la même chose pour tous les indicateurs osseux du même cliché radiographique ;
d. Faire la même chose pour tous les clichés radiographiques ;
e. Faire la même chose pour chaque sexe à part.

Concernant l'**état** de l'indicateur osseux [point (a)], il faut savoir qu'il obéit aux stades de maturation stipulés par Sempé. En effet, en se référant aux études du Professeur Sempé [136, 137, 139], tous les indicateurs de maturation, durant leur ossification, évoluent par trois stades maturatifs : l'auxogénèse, avec ses quatre sous-stades, Ø (o barré), Q, P et N ; la morphogénèse, avec ses trois sous-stades, M, L et K ; et la synostogénèse (ou l'arthrogénèse), avec ses trois sous-stades, R, S et T.

Le schéma d'ossification est basé sur cet état fixe, c'est-à-dire le sous-stade, de l'indicateur sur le cliché radiographique.

Pratiquement, pour ne pas trop détailler, nous allons choisir uniquement trois « grands états » à utiliser pour tracer le schéma d'ossification : l'**apparition**, la **présence** et la **terminaison**.

L' « apparition » signifie la première manifestation du point d'ossification, son avènement ou formation, sous forme d'un « point flou », à contours « fantomatique », au centre de l'os ou de l'épiphyse déjà cartilagineux [sous-stades Ø ou Q].

La « présence » est l'existence du point d'ossification pendant une certaine durée, avec un aspect déjà évolué [sous-stade P et plus].

La « terminaison » désigne les phases presque terminale [sous-stade S] ou terminale [sous-stade T].

2. Rechercher les « critères osseux de la puberté » :

Les « critères osseux de la puberté » sont les points d'ossification de quelques indicateurs osseux du poignet et de la main, objectivés radiographiquement, et dont leur **apparition**, isolée ou couplée, est contemporaine de la période pubertaire.

Cette recherche va s'intéresser à quelques indicateurs de façon particulière, cités dans des études [16, 27, 34, 57, 67, 89], et dont leur apparition semble coïncider avec le déclenchement de la puberté ou accompagne la période pubertaire.

Ces critères osseux sont au nombre de trois :

- l'os sésamoïde du pouce ;
- le pisiforme ;
- l'hamulus de l'os hamatum.

Les trois indicateurs osseux de la puberté, qui sont des repères faciles, pratiques et synchrones de la période pubertaire, apparaissent à des stades d'évolution bien précis, comme suit :

- l'os sésamoïde du pouce : apparait au début de l'auxogénèse, au sous-stade Ø (o barré) ou Q ;
- le pisiforme : apparait au début de l'auxogénèse, au sous-stade Ø (o barré) ou Q ;
- l'hamulus de l'os hamatum : apparait à la fin de la morphogénèse, au sous-stade K de l'hamatum.

A côté de ces repères osseux, d'autres critères radiologiques peuvent s'ajouter, tels : (1) la fusion de l'épiphyse distale du radius, indicateur de l'âge postpubertaire et (2) la fusion des épiphyses proximales des phalanges en général, utile pour les âges charnières dans le cadre médico-légal.

Notre méthode consiste à tracer un schéma d'ossification focalisé sur les trois principaux indicateurs osseux de la puberté à partir de la lecture du compte rendu n° 2 de l'analyse Maturos des clichés radiographiques des enfants et des adolescents de l'échantillon. Ce schéma va nous permettre de suivre l'apparition

et la présence radiologiques de ces critères osseux et de dénombrer la répétition de ce « comportement » sur tous les clichés radiographiques, principalement ceux de la période péri-pubertaire, qui débute vers 8-13 ans chez les filles et 9-14 ans chez les garçons, et s'achève vers 16 ans chez la fille et 18 ans chez les garçons.

3. Editer un « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » :

Un « Atlas anatomo-radiologique » est une étape récapitulative de l'étude, il défile, sur des clichés radiographiques, l'évolution successive de la maturation squelettique des enfants et des adolescents « algériens ».

Bien qu'il soit préliminaire, puisqu'il est basé sur le nombre limité qui forme l'échantillon, cet Atlas va permettre d'exposer des clichés radiographiques sélectionnés en réponse aux stades maturatifs des enfants et des adolescents.

Pourquoi ? et **Comment ?**

Pour un objectif pareil, l'édition d'un Atlas, il serait intéressant de constater, avec Professeur Sempé « l'intérêt préférentiel porté à l'étude du squelette du poignet et de la main, [ainsi qu'à l'] « Atlas de la Maturation Squelettique, [qui] ne saurait faire exception à cette règle fondamentale » [139].

Plusieurs motifs nous incitent à se dépêcher à réaliser ce « recueil ordonné de cliché radiographiques » qui sera conçu pour représenter notre collection radiographique, et suivre l'évolution de la maturation squelettique année après année, un Atlas qui sera joint à cette étude. Entre autre : (1) le manque d'un atlas pareil en Algérie, (2) le manque des études actualisées des atlas et tables envisagés à l'estimation de l'AO, (3) le manque des études de validation des méthodes appliquées à des populations contemporaines « locales ».

Une fois les résultats de cette étude seront discutés et validés, **l'Atlas anatomo-radiologique** va naître afin de, en contrepartie, valoriser l'étude et exploiter ses données.

L'Atlas désigne l'âge osseux, il exposera dans des reproductions (clichés radiographiques), les différents stades évolutifs de la maturation squelettique chez les enfants et les adolescents des deux sexes, qui font partie de notre série et qui seront choisies sur la base de la « représentabilité » par rapport à la tranche d'âge et par rapport au sexe.

Pour cette raison, cet Atlas doit remplir certaines conditions :

- Contenir des reproductions radiographiques, en les sériant en séquences, année après année et semestre par semestre, selon les dix-sept grandes périodes chronologiques, à mesure d'une seule reproduction par année et par sexe ;
- Ces espacements peuvent être étroits, de 6 mois, selon la disponibilité de la collection et la qualité de la reproduction, en créant, éventuellement, trente-quatre périodes chronologiques ;
- Les reproductions sont sélectionnées en fonction de l'AO et non de l'AC;

- La reproduction sélectionnée est la plus « représentative » : c'est celle dont la DS est petite, c'est-à-dire la différence AO-AC est la moindre, c'est celle qui contient le grand nombre d'indicateurs osseux, et c'est celle qui a une bonne qualité ;
- Du fait du décalage de maturation entre filles et garçons, les reproductions doivent être distinctes selon le sexe, pour différencier les reproductions féminines des reproductions masculines.

En ci-après, les différents titres et calculs qui seront développés dans le chapitre « Résultats » :

➢ **<u>Le schéma d'ossification :</u>**

1. Le rapport, sur le tableau de schéma d'ossification, de l'état des indicateurs osseux de tous les clichés radiographiques des filles, en AO ;
2. Le rapport, sur le tableau de schéma d'ossification, de l'état des indicateurs osseux de tous les clichés radiographiques des garçons, en AO ;
3. La lecture de l'évolution de la maturation squelettique de l'ensemble des indicateurs, en dégageant les grandes phases de la maturation squelettique, en observant l'évolution (apparition et terminaison) successive des indicateurs et en marquant le décalage d'évolution entre les filles et les garçons ;
4. La lecture de l'évolution de la maturation squelettique de chaque indicateur à part, en déterminant les intervalles d'évolution, par sexe ;
5. La lecture de l'évolution de la maturation squelettique de quelques groupes des indicateurs, en cherchant les particularités communes des indicateurs qui forment le même groupe.

➢ **<u>Les critères osseux de la puberté :</u>**

6. Le traçage, sur un tableau, du schéma d'ossification des trois principaux indicateurs osseux de la puberté ;
7. La recherche des changements (apparition, présence…) visibles sur le schéma d'ossification pendant la période pubertaire, par sexe et en AC ;
8. La détermination sur le schéma d'ossification, des intervalles d'âge d'apparition des indicateurs de la puberté, par sexe et en AC ;
9. Le calcul de la fréquence d'apparition des indicateurs osseux radiologiques de la puberté par sexe.

➢ **<u>L'Atlas anatomo-radiologique :</u>**

10. La détermination des tranches d'âge (osseux) successive, par semestre et par sexe ;
11. La sélection des clichés radiographiques adéquats, sur la base des critères déjà cités, constituant deux séquences (collections de reproductions), masculines et féminines.

(5) LES CORRELATIONS DE L'ÂGE OSSEUX

Le troisième objectif de cette étude est de « démontrer les liens de corrélation entre l'âge osseux d'une part et un certain nombre de paramètres d'autre part », et à la lumière de cet objectif qu'on va tracer cette quatrième partie de « Méthodes ».
En fait, il y a plusieurs paramètres, liés directement ou indirectement à la croissance, et qui sont corrélés avec la maturation squelettique et donc aux âges osseux des personnes.
La recherche de ces corrélations et leur mise en évidence par des calculs statistiques va illustrer l'idée d'une « maturation squelettique influencée et influente » : une **maturation influencée** par les facteurs socio-économiques, nutritionnels, hormonaux (sexuels) et physique, mais aussi une **maturation influente** sur la croissance de la personne notamment la croissance staturale par l'ossification des cartilages de croissance.
Le titre présent abordera les méthodes d'étude et d'analyse des liens de corrélation entre la maturation osseuse d'une part, et l'indice de masse corporelle (IMC) et le statut socio-économique (SSE) d'autre part.

❖ L'indice de masse corporelle (IMC) :

L'indice de masse corporelle est calculé à partir d'un rapport de deux paramètres de croissance, la taille et le poids, en appliquant une règle mathématique simple dite, indice de Quételet : IMC = Poids /Taille^2

La croissance, staturo-pondérale, quantifiable par deux mesures biométriques, la taille et le poids, ne reflète pas à elle seule l'état de la croissance de l'enfant ou de l'adolescent, un troisième paramètre peut compenser ce « manque » et ouvrir un horizon de compréhension de la relation taille - poids. Autrement dit : plus la taille augmente ou le poids diminue ou les deux ensemble, plus l'IMC diminue, l'enfant est « maigre » ; plus la taille diminue ou le poids augmente ou les deux ensemble, plus l'IMC diminue, l'enfant est « obèse » ; c'est pour cette raison que cet indice est dit l'indice de corpulence, c.-à-d. qui reflète indirectement la masse grasse corporelle.

Notre étude va faire correspondre l'IMC à l'AO, à la recherche d'une éventuelle corrélation et sa « proportionnalité », c'est-à-dire une corrélation « positive » (dans le même sens) ou « négative » (dans le sens contraire) et pour mettre en évidence l'influence de l'IMC sur la maturation squelettique.

Pour cela, la méthode de travail exige une étape préparatoire de deux points successifs (déjà faite, voir : volet « Matériel »), comme suit :

- (1) Le calcul de l'indice de masse corporelle (IMC), selon la règle de Quételet, pour chaque enfant et adolescent de la population d'étude ;

- (2) Le classement des enfants et des adolescents de la population, selon l'IMC, en trois catégories de corpulence : « Normaux », « Maigres » et « Obèses ».

❖ Le statut socio-économique (SSE) :

Le statut socio-économique est un facteur influençant la maturation squelettique de l'enfant et de l'adolescent, c'est un paramètre à plusieurs aspects, en rapport avec l'environnement et le mode de vie, qui agissent directement et indirectement sur le développement de la personne.

La relation d'influence est évidente et rapportée dans différentes études (voir : volet « Matériel »), qui constatent que l'amélioration du niveau socio-économique entraine une accélération de la maturation squelettique, l'inverse aussi est juste.

Notre étude va faire correspondre le SSE à l'AO, à la recherche d'une éventuelle corrélation et sa « proportionnalité », dans le même sens ou dans le sens contraire, tout en recherchant l'influence du SSE sur la maturation squelettique.

Pour cela, la méthode de travail exige une étape préparatoire (déjà faite, voir : volet « Matériel ») : le classement des enfants et des adolescents de la population, selon le SSE, en trois GSE : « Favorisé (F) », « Moyennement favorisé (mF) » et « Défavorisé (dF) ».

En ci-après, les différents titres et calculs qui seront développés dans le chapitre « Résultats » :

➢ **<u>La corrélation AO-IMC :</u>**

1. Le test de la normalité de la variable IMC.
2. La répartition de la population par rapport aux catégories de l'IMC, par sexe ;
3. Le calcul de la moyenne de l'IMC par catégorie, et par sexe, avec ET ;
4. Le calcul de la corrélation IMC-AO, par catégorie de corpulence et la moyenne de la différence AO-AC, avec calcul de coefficient de corrélation et du test ANOVA.

➢ **<u>La corrélation AO-SSE :</u>**

5. La répartition de la population par rapport aux groupes du statut socio-économique GSE, par sexe ;
6. Le calcul de la corrélation SSE-AO, par groupe GSE et la moyenne de la différence AO-AC, avec calcul de coefficient de corrélation et test de Student.

➢ **<u>La corrélation IMC-SSE :</u>**

7. Le calcul de la corrélation IMC-SSE, par catégories IMC et groupes SSE, par sexe, avec test de Khi 2.

RÉSULTATS

II - RÉSULTATS

La représentation, à la fois chiffrée et graphique, de la maturation squelettique est le fruit de ce nouveau chapitre, « Résultats ».

En fait, chaque chiffre et pourcentage, chaque courbe et histogramme, chaque tableau, etc… illustrent l'état de la maturation squelettique de la population d'étude et démasquent ses aspects et ses relations.

Ce chapitre présentant les résultats de notre étude, fait suite, certes, au chapitre précédent, déjà traité, en suivant ainsi les voies de travail tracées par le volet « Méthodes » et en inspirant ses étapes, pas-à-pas.

La partie « Résultats » s'est concentrée sur énormément de calculs statistiques à la recherche d'énormément de résultats pertinents, le but était de « disséquer » ce processus biologique, la maturation osseuse, pour l'étudier « scientifiquement » et le comprendre « rationnellement », en suivant deux étapes :

A. Les étapes préalables :

Ce sont des travaux préparatoires indispensables avant d'entamer les opérations statistiques. Ce sont précisément :

1. **Le rassemblement des données collectées** et dispatchées dans le chapitre précédent « Matériels et Méthodes», qui concernent l'échantillon : les informations générales, les âges osseux, les indices de masse corporelle, les statuts socio-économiques, etc… ;
2. **La saisie de toutes ces données sur le Logiciel SPSS**, créant une « base des données » riche et complète. Une richesse (21 variables x 138 sujets, soit une matrice de 2898 données) qui nous a conduits à saisir les données avec une grande prudence dans un souci de ne pas omettre aucun détail ou tromper dans un détail ;
3. **La vérification générale de la base des données**, par rapport aux données déjà exposées dans le chapitre précédent.

B. Les étapes analytiques :

Ce sont l'ensemble des opérations statistiques à effectuer sur le programme SPSS, qui s'accordent avec les objectifs déjà tracés de cette étude.

Ces étapes analytiques tiennent à vérifier les différentes corrélations de l'âge osseux (AO) de l'enfant et de l'adolescent avec l'âge civil (AC), l'indice de masse corporelle (IMC), le statut socio-économique (SSE) ; tiennent aussi à suivre les différents stades de développement maturatif postnatal des indicateurs osseux du poignet et de la main, avec les particularités données aux critères osseux radiologiques de la puberté.

Ces étapes analytiques vont être basées sur des opérations telles : les effectifs, les fréquences, les moyennes, les écart-types (ET), les tests statistiques, etc…

Rappelant que, dans un but de simplicité et de précision des âges civils et osseux, tous les âges qui figurent dans cette étape statistique sont exprimés uniquement par les mois et non par les années, ou les années et les mois ensemble ou par les années décimales.

Ce deuxième chapitre, sera traité selon le plan suivant :

(1) La présentation de la population
(2) L'applicabilité de la méthode de Sempé
(3) L'évolution de la maturation squelettique
(4) Les corrélations de l'âge osseux

(1) LA PRÉSENTATION DE LA POPULATION

Toute l'étude est basée sur une population de 138 enfants et adolescents, des deux sexes, âgés de 3 mois à 203 mois (16 ans et 11 mois), répartis sur 17 tranches d'âges et habitent différentes communes de la Wilaya d'Annaba.

Les sujets de la population ont été recrutés sur des années différentes pour bénéficier, chacun, d'un cliché radiographique, fait dans un établissement hospitalier, appartenant au secteur public ou libéral, ou carrément dans un centre d'imagerie médicale (secteur libéral).

Dans les lignes qui suivent, une représentation chiffrée, sous forme de tableaux, et graphique détaillant toutes les caractéristiques de notre population.

(A) La répartition de l'échantillon, par sexe :

Notre échantillon rassemble 138 sujets, entre enfants et adolescents, et qui se répartissent en deux grands groupes, 70 filles (soit 50,7 %) et 68 garçons (soit 49,3 %).

Tableau 51 : La répartition de l'échantillon, par sexe

	Fréquence	Pourcentage
Filles	70	50,7
Garçons	68	49,3
Total	138	100,0

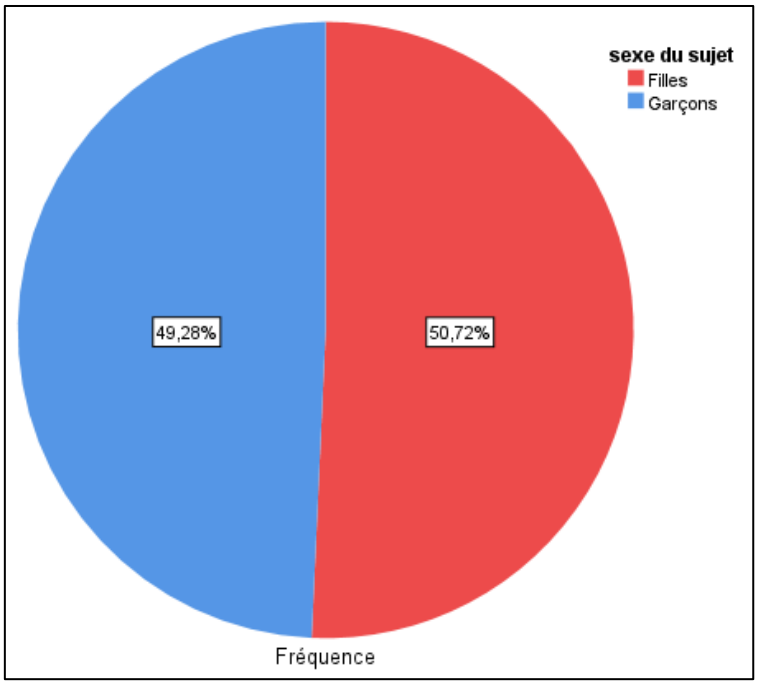


Figure 158 : La répartition de l'échantillon, par sexe
(Représentation graphique en circulaire)

(B) La moyenne d'âge civil, par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 52), calcule la moyenne d'âge de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants.

Et en ci-dessous (Fig. 181), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'âge par sexe.

Tableau 52 : La moyenne d'AC, par sexe

sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type
Filles	80,60	70	54,109
Garçons	73,40	68	56,277
Total	77,05	138	55,105

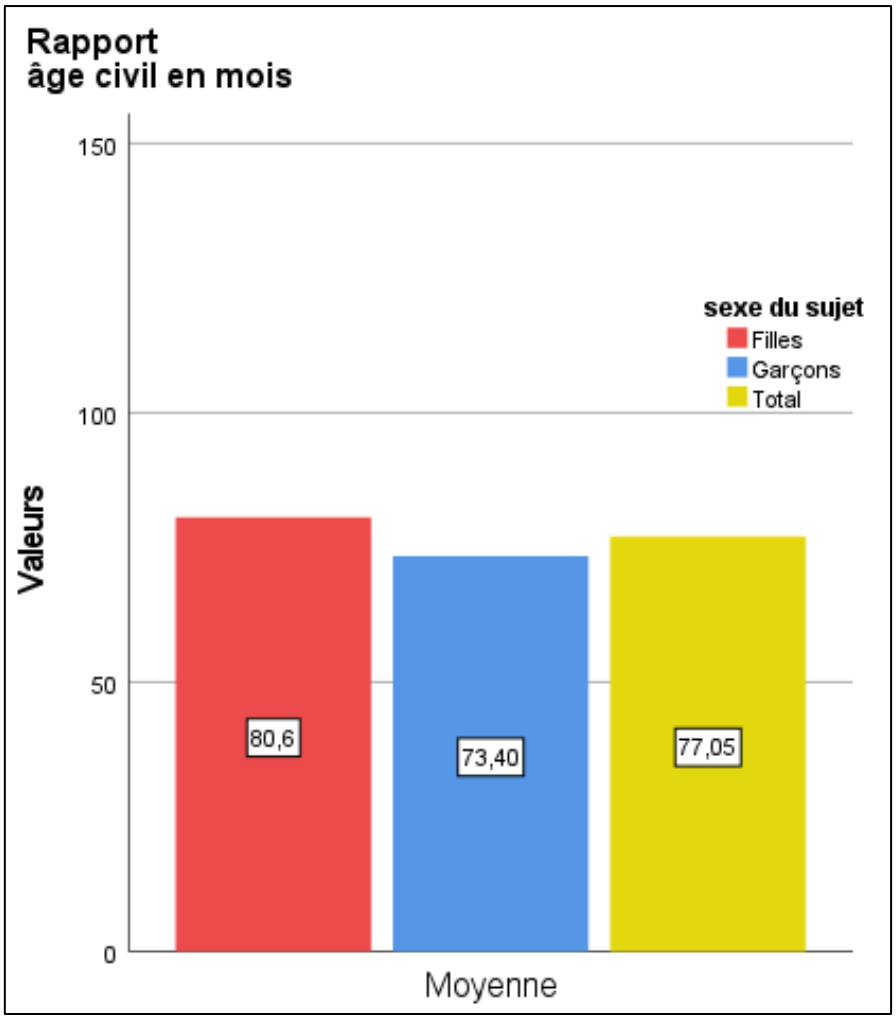


Figure 159 : La moyenne d'AC, par sexe
(Représentation graphique en barres)

(C) Les statistiques d'âge civil :

Les deux tableaux ci-après (Tab. 53), calculent la médiane d'âge et les âges minimum et maximum de l'échantillon, puis par sexe.

Et en ci-dessous (Fig. 160), la représentation graphique en deux boîtes à moustaches (diagrammes en boîte) présentant la médiane et les âges minimum et maximum pour chaque sexe.

Tableau 53 : Les statistiques d'AC, par total et par sexe

Moyenne	77,05
Médiane	67,50
Ecart type	55,105
Minimum	3
Maximum	203

Filles	Moyenne	80,60
	Médiane	78,00
	Ecart type	54,109
	Minimum	5
	Maximum	203
Garçons	Moyenne	73,40
	Médiane	60,50
	Ecart type	56,277
	Minimum	3
	Maximum	196

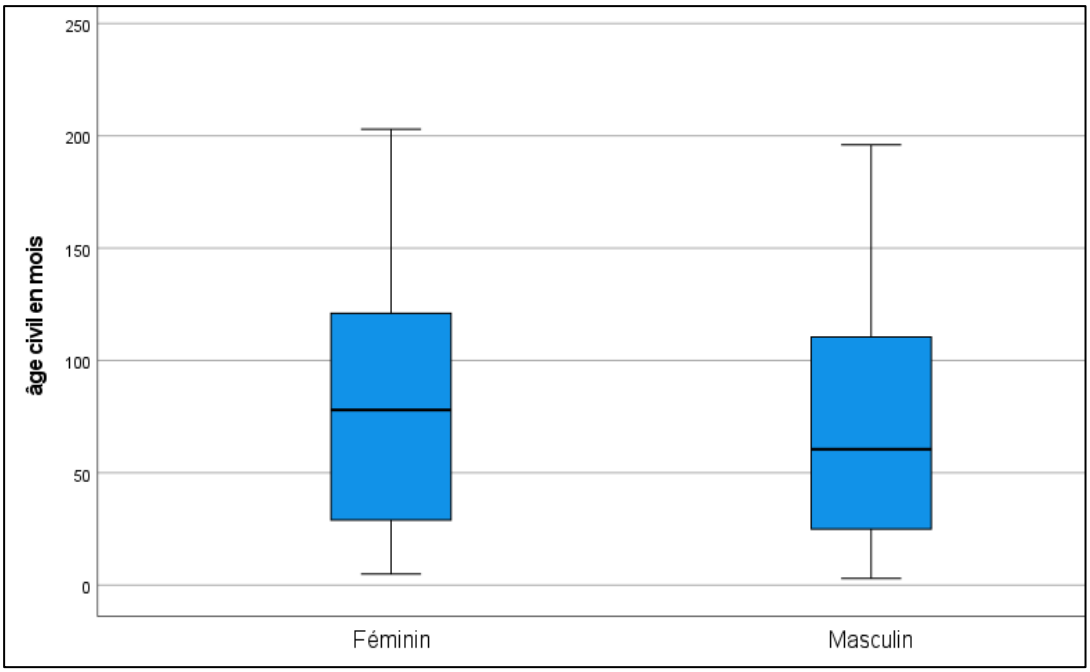


Figure 160 : La médiane d'AC, par sexe
(Présentation graphique en boîtes à moustaches)

(D) La répartition de l'échantillon par tranches d'âge (civil), et par sexe :

La répartition de l'échantillon par des tranches d'AC, d'un an d'écart (soit 12 mois) est d'ordre pratique, surtout dans l'évaluation des âges osseux et pour avoir un aperçu à la fois global mais progressif sur l'évolution de la maturation squelettique de l'échantillon.

L'échantillon est divisé en 17 tranches d'âge, comme suit :

- La 1ère tranche : de 0 mois à 11 mois ;
- La 2ème tranche : de 12 mois à 23 mois ;
- La 3ème tranche : de 24 mois à 35 mois ;
- La 4ème tranche : de 36 mois à 47 mois ;
- La 5ème tranche : de 48 mois à 59 mois ;
- La 6ème tranche : de 60 mois à 71 mois ;
- La 7ème tranche : de 72 mois à 83 mois ;
- La 8ème tranche : de 84 mois à 95 mois ;
- La 9ème tranche : de 96 mois à 107 mois ;
- La 10ème tranche : de 108 mois à 119 mois ;
- La 11ème tranche : de 120 mois à 131 mois ;
- La 12ème tranche : de 132 mois à 143 mois ;
- La 13ème tranche : de 144 mois à 155 mois ;
- La 14ème tranche : de 156 mois à 167 mois ;
- La 15ème tranche : de 168 mois à 179 mois ;
- La 16ème tranche : de 180 mois à 191 mois ;
- La 17ème tranche : de 192 mois à 203 mois.

Le tableau ci-après (Tab. 54), illustre la répartition de l'échantillon, par tranches d'âge des sujets, et par sexe.

Et plus en ci-dessous (Fig. 161), la représentation graphique en pyramide de cette répartition.

Tableau 54 : La répartition de l'échantillon, par tranches d'âge, et par sexe

		Filles	Garçons	Total
tranche d'âge civil	1	4	6	10
	2	8	9	17
	3	7	9	16
	4	7	2	9
	5	4	7	11
	6	3	6	9
	7	3	4	7
	8	3	4	7
	9	9	4	13
	10	4	2	6
	11	5	3	8
	12	5	2	7
	13	1	1	2
	14	2	3	5
	15	1	2	3
	16	2	2	4
	17	2	2	4
Total		70	68	138

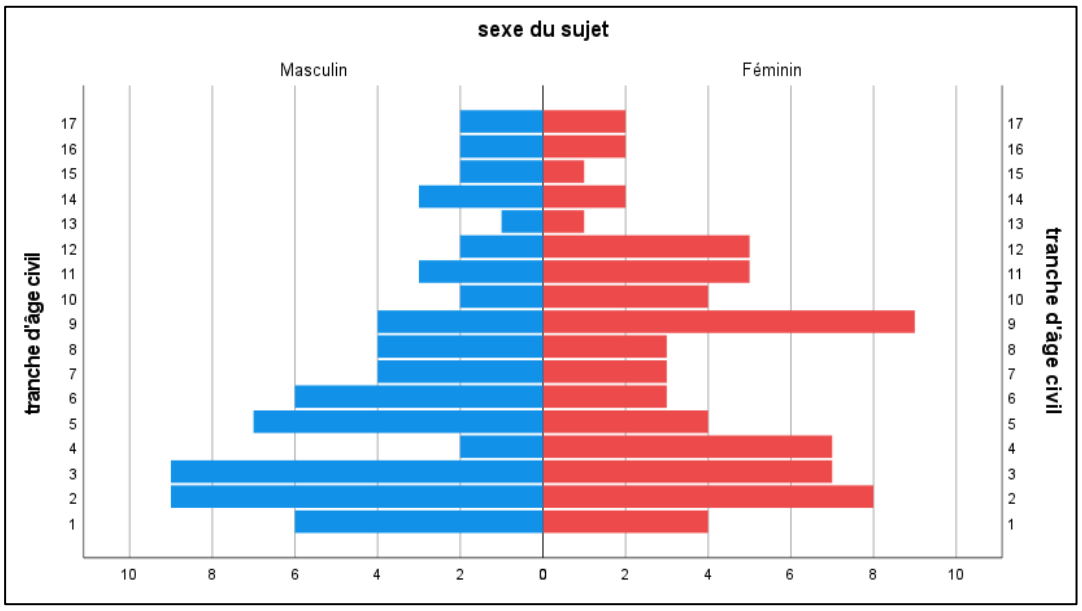


Figure 161 : La répartition de l'échantillon, par tranches d'âge, et par sexe (Présentation graphique en pyramide)

(E) La répartition de l'échantillon par commune, et par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 55), illustre la répartition de l'échantillon par domicile (commune d'habitat), et par sexe.

Et en ci-dessous (Fig. 162), la représentation graphique en circulaire de cette répartition.

La commune d'Annaba a pris la part de lion ; il n'y a pas une représentation totale de toutes les communes de la Wilaya ; comme il y a aussi des domiciles non identifiés, d'habitude par omission lors de l'interrogatoire.

Tableau 55 : La répartition de l'échantillon, par commune et par sexe

		Filles	Garçons	Total
domicile du sujet	Annaba	47	41	88
	Autre	4	6	10
	Berrahal	1	4	5
	Chorfa	0	3	3
	El-Bouni	6	2	8
	El-Eulma	0	3	3
	ElHadjar	1	3	4
	SidiAmar	11	6	17
Total		70	68	138

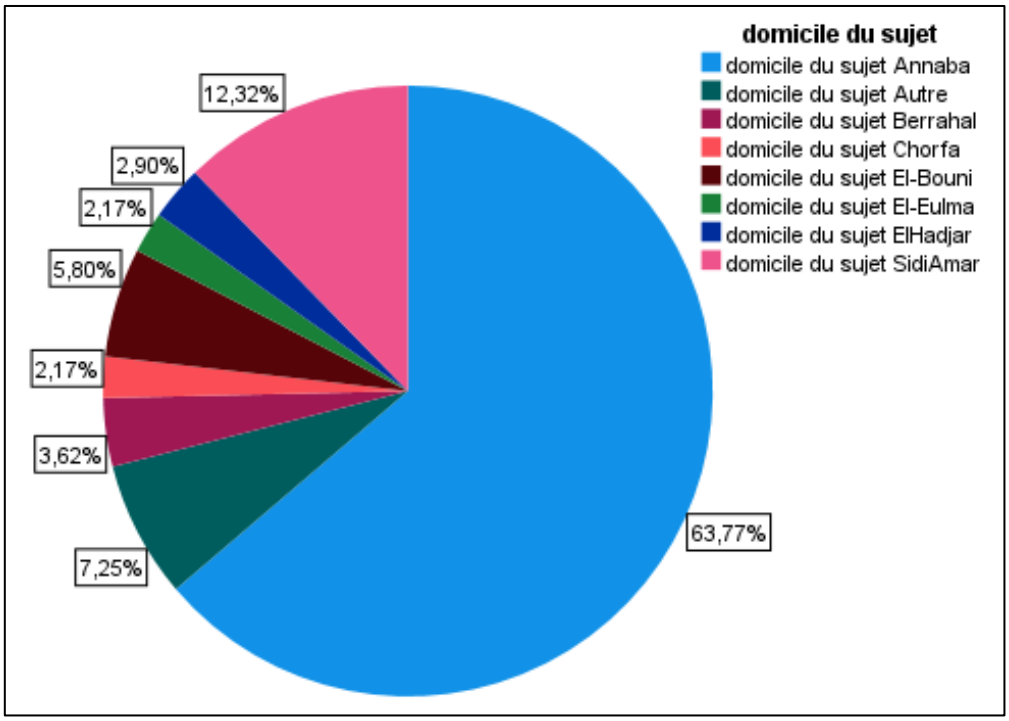


Figure 162 : La répartition de l'échantillon, par commune
(Présentation graphique en circulaire)

(F) La répartition de l'échantillon par date de recrutement, et par sexe :

Par date de recrutement, ça sous-entend la date de la prise du cliché radiographique. Le tableau ci-après (Tab. 56), indique les années de recrutement, c'est-à-dire celles de la prise du cliché radiographique, par sexe.

Et en ci-dessous (Fig. 163), la représentation graphique en circulaire de la répartition de l'échantillon par rapport à ces dates.

Tableau 56 : La répartition de l'échantillon, par date de recrutement et par sexe

		Filles	Garçons	Total
date de prise du cliché radiographique	2012	0	1	1
	2013	7	3	10
	2014	45	42	87
	2015	8	13	21
	2023	2	2	4
	2024	8	7	15
Total		70	68	138

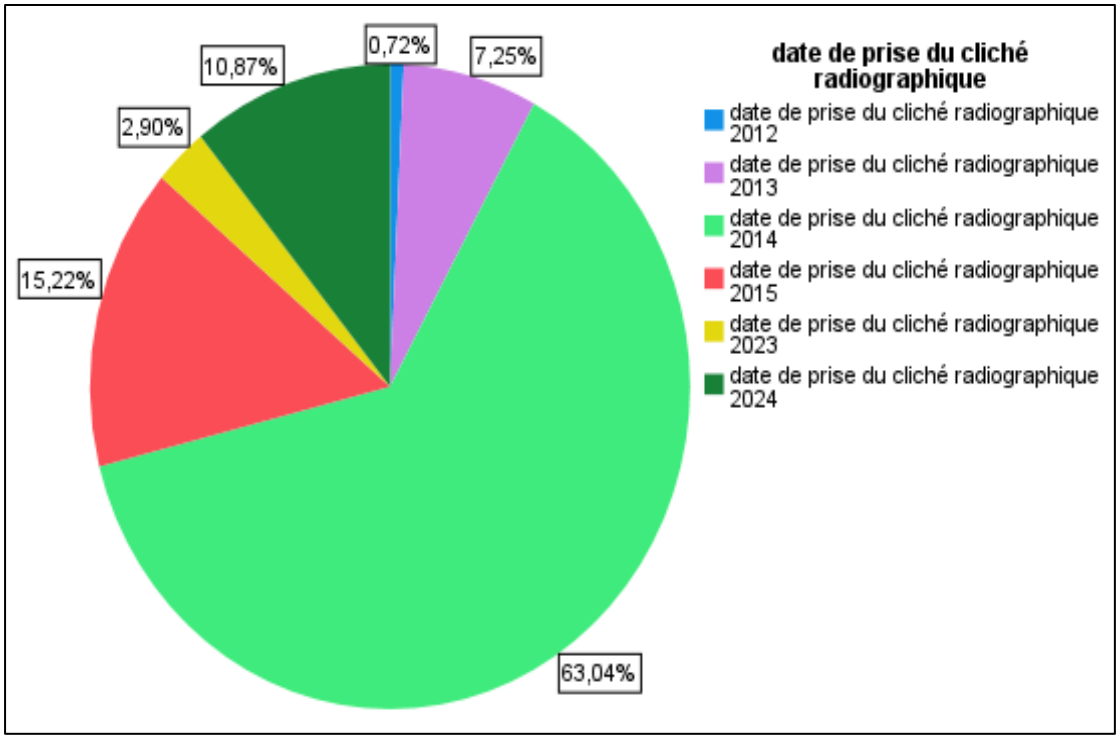


Figure 163 : La répartition de l'échantillon par date de recrutement (Présentation graphique en circulaire)

(G) La répartition de l'échantillon par rapport à l'origine des clichés radiographiques, et par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 57), présente le nombre des clichés radiographiques, des filles et des garçons, qui ont été fait à la clinique pédiatrique Sainte Thérèse, à la clinique Alfarabi et à d'autres centres d'imagerie médicale.

Et en ci-dessous (Fig. 164), la représentation graphique en circulaire de cette répartition.

Tableau 57 : La répartition de l'échantillon par sources des clichés radiographiques, et par sexe

		Filles	Garçons	Total
hopital source des radiographies	Alfarabi	22	22	44
	Autre	10	10	20
	St_Thér	38	36	74
Total		70	68	138

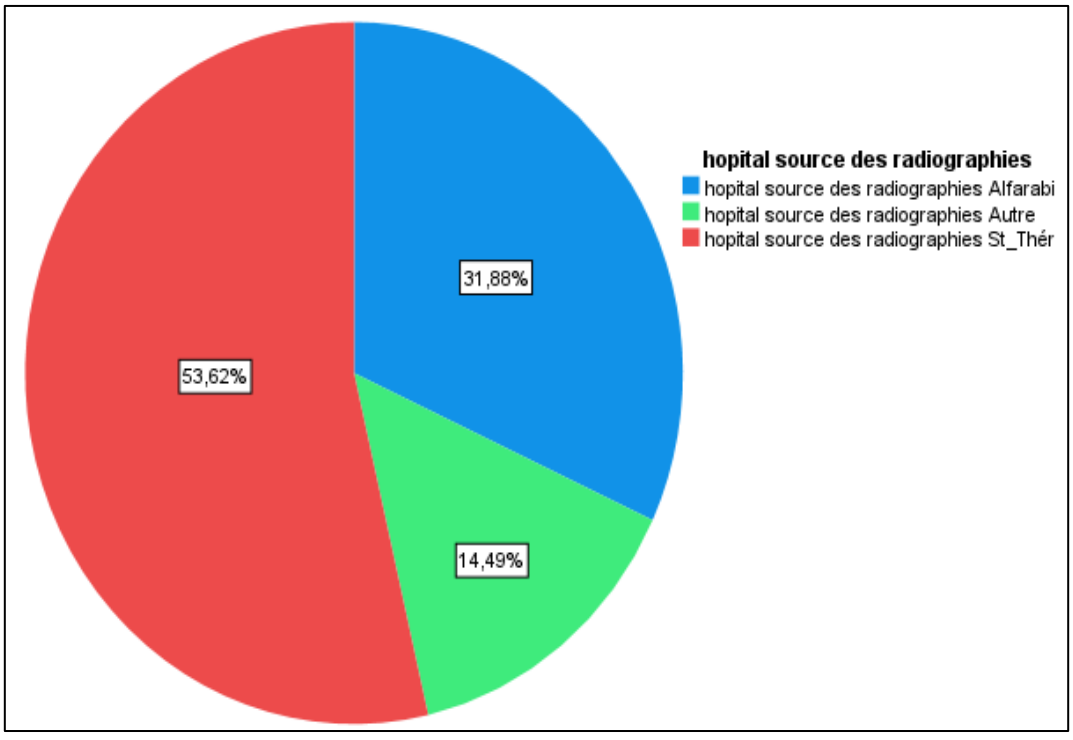


Figure 164 : La répartition de l'échantillon, par sources des clichés radiographiques (Représentation graphique en circulaire)

(H) Le test de normalité de l'échantillon :

Ce test est calculé pour vérifier la « normalité » de la population d'étude, représentée ici par l'AC des enfants et des adolescents. Une distribution « normale » en sens statistique, suit la courbe de Gauss et se présente symétrique.

Pour cela, on teste deux paramètres qui sont le **coefficient d'Asymétrie** et **l'Aplatissement (kurtosis)**, les deux calculé par le SPSS : le coefficient d'« asymétrie » mesure le degré d'asymétrie de la distribution d'une variable aléatoire, ici l'AC ; le Kurtosis mesure le degré d'Aplatissement ou de rétrécissement de la distribution d'une variable aléatoire, ici l'AC.

- Quand la distribution est parfaitement normale, ces deux paramètres **= zéro** (distribution symétrique et non aplatie, comme celle en cloche de Gauss).
- Si la distribution **s'étale sur la droite**, le coefficient d'asymétrie est **> 0** ; Si la distribution **s'étale sur la gauche**, le coefficient d'asymétrie est **< 0**
- Si la distribution est **aplatie**, le kurtosis est **< 0** ; Si la distribution est **rétrécie**, le kurtosis est **> 0**
- De façon générale, comme règle empirique, tant que la valeur varie entre +1 et -1 des deux paramètres, pas loin de zéro, la distribution est considérée qu'elle suit la loi normale.

Le tableau ci-après (Tab. 58), calcule l'asymétrie et le kurtosis, qui se trouvent de part et d'autre de la valeur zéro. La distribution suit alors la loi normale et se trouve aplatie et s'étale à droite.

En ci-dessous (Fig. 165), la représentation graphique en histogramme avec la courbe gaussienne, où on voit un échantillon qui suit de façon générale cette courbe.

Et plus en dessous (Fig. 166), la représentation graphique en dispersion, où la variable testée, l'AC, s'aligne par rapport à la droite de la courbe QQ (Quantile-Quantile).

Tableau 58 : Le test de normalité de l'échantillon

âge civil en mois		
N	Valide	138
	Manquant	0
Asymétrie		,546
Erreur standard d'asymétrie		,206
Kurtosis		-,737
Erreur standard d'aplatissement		,410

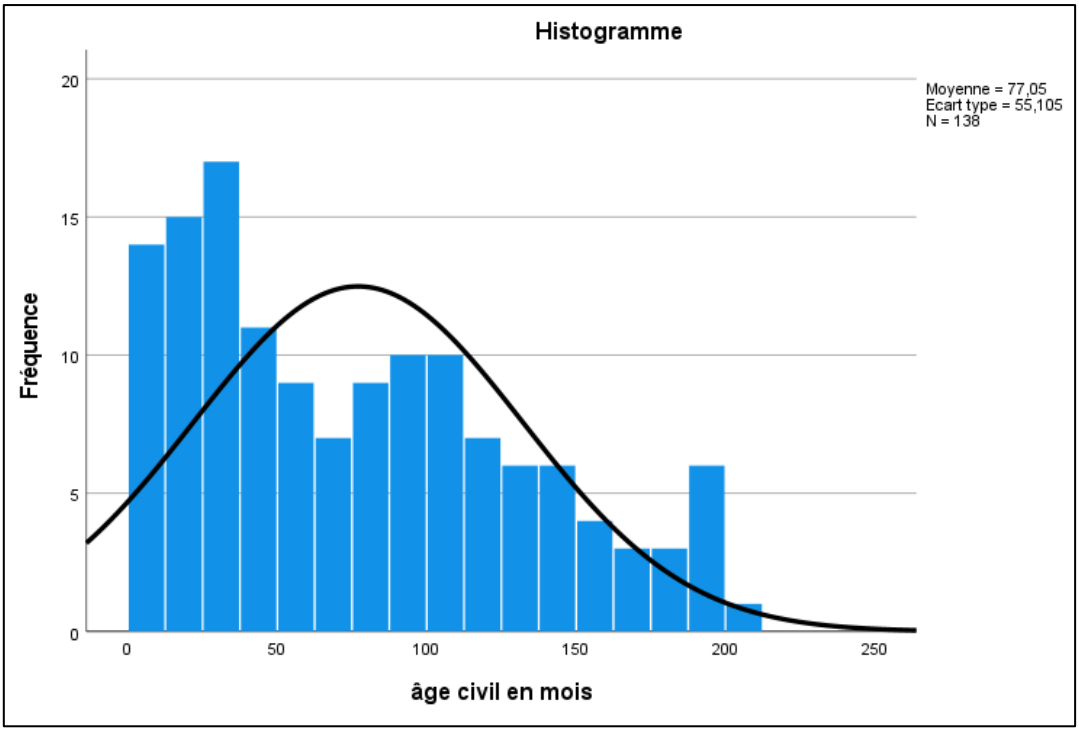


Figure 165 : Le test de normalité de l'échantillon (Représentation graphique en histogramme)



Figure 166 : Le test de normalité de l'échantillon (Représentation graphique en dispersion)

(2) L'APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE DE SEMPÉ

En matière d'évaluation de la maturation squelettique, la fiabilité d'une méthode dédiée à cette « tâche » est un critère qui peut être testé statistiquement.
Le Logiciel SPSS est un programme qui permet d'effectuer plusieurs opérations et tests, d'ordre mathématique, afin de prouver « scientifiquement » la notion de « fiabilité », et donc d' « applicabilité » de la méthode d'évaluation de la maturation squelettique de Sempé, à une population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens.
Sur cette piste, le SPSS va calculer plusieurs opérations évaluées par la méthode de Sempé, en utilisant son propre Logiciel, le Maturos® 4.0, entre autres :

- L'âge osseux et ses caractéristiques ;
- La différence entre l'âge osseux et l'âge civil ;
- La variabilité de lecture de l'âge osseux ;
- La durée de lecture de l'âge osseux.

Il est à noter que l'âge osseux a été déterminé bien avant cette étape, dans le chapitre « Matériel et Méthodes », quand nous avions exposé le Logiciel Maturos® 4.0.

(A) La relation entre l'âge osseux et l'âge civil :

Avant de vérifier la relation qui peut exister entre l'AO et l'AC, la méthodologie de la réflexion exige de faire plusieurs calculs sur le SPSS qui préparent à cette étape ultime…

1. Le calcul de la normalité de l'âge osseux :

La vérification de la normalité de l'âge osseux de l'échantillon a le même objectif que celle déjà faite sur l'AC (voir plus haut).

Pour cela, on teste deux paramètres qui sont l'Asymétrie et l'Aplatissement (kurtosis) : on trouve une normalité respectée avec une distribution de l'AO étalée vers la droite et un kurtosis aplatie.

Le tableau en ci-après (Tab. 59), calcule l'asymétrie et le kurtosis, qui se trouvent de part et d'autre de la valeur zéro.

En ci-dessous (Fig. 167), la représentation graphique en histogramme avec la courbe gaussienne, où on voit l'AO de l'échantillon qui suit de façon générale cette courbe.

Et plus en dessous (Fig. 168), la représentation graphique en dispersion, où la variable testée, l'AO, s'aligne par rapport à la droite de la courbe QQ.

Tableau 59 : Le test de normalité de l'AO de l'échantillon

âge osseux en mois		
N	Valide	138
	Manquant	0
Asymétrie		,387
Erreur standard d'asymétrie		,206
Kurtosis		-,966
Erreur standard d'aplatissement		,410

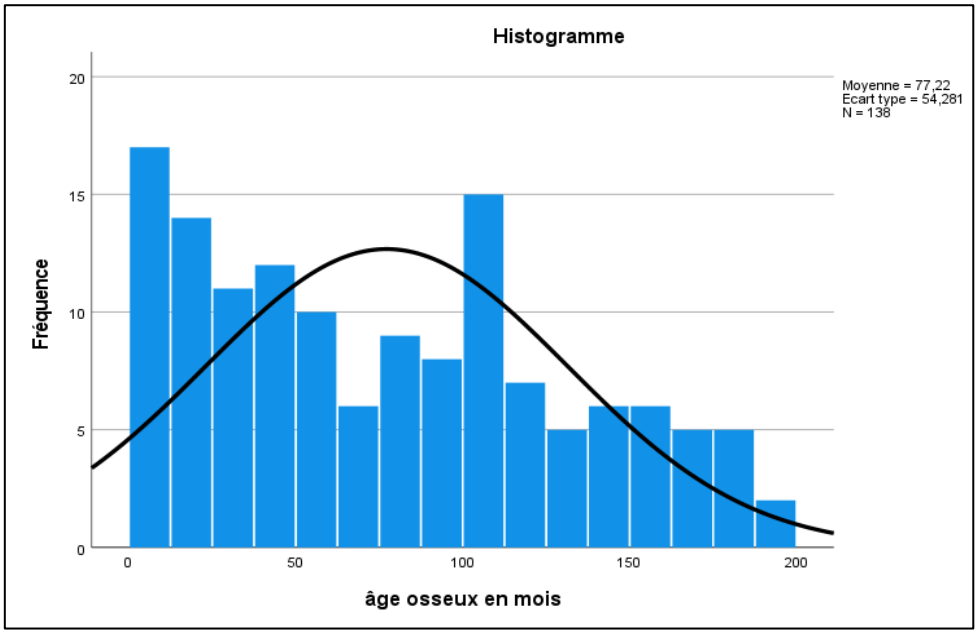


Figure 167 : Le test de normalité de l'AO de l'échantillon (Représentation graphique en histogramme)

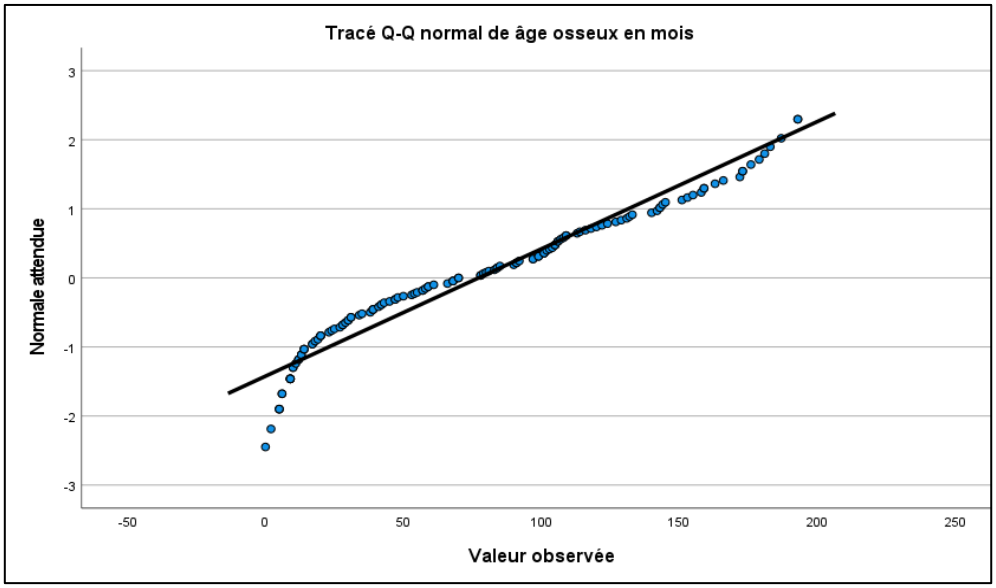


Figure 168 : Le test de normalité de l'AO de l'échantillon (Représentation graphique en dispersion)

2. Le calcul de la moyenne de l'âge osseux :

Le tableau ci-après (Tab. 60), calcule la moyenne d'âge de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants.

En ci-dessous (Fig. 169), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'âge par sexe.

Tableau 60 : La moyenne de l'AO, par sexe

âge osseux en mois

sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type
Filles	80,69	70	52,877
Garçons	73,65	68	55,855
Total	77,22	138	54,281

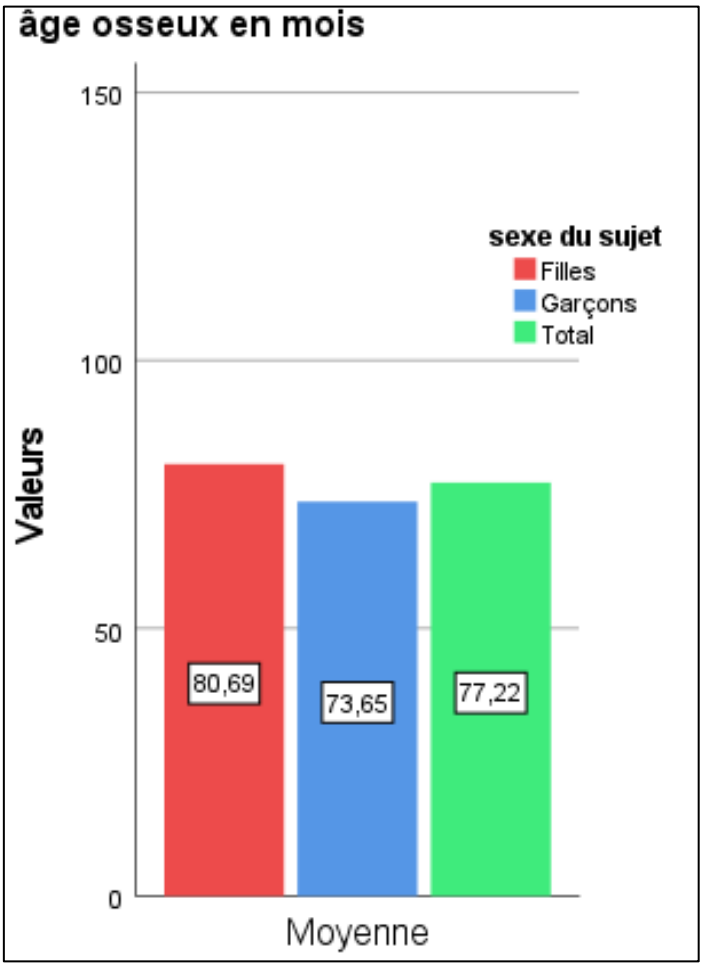


Figure 169 : La moyenne de l'AO, par sexe
(Représentation graphique en barres)

3. Les statistiques de l'âge osseux :

En ci-après, deux tableaux qui exposent les statistiques globales (Tab. 61) et détaillées par tranches d'âge (Tab. 62) des âges osseux. Ces statistiques intéressent les moyennes, les ET, les médianes, les valeurs minimales et maximales.

Et en ci-dessous, cinq représentations graphiques illustrant ces deux tableaux :

- Représentation graphique en boîte à moustaches (Fig. 170), indiquant la médiane et les deux âges osseux de la population, le minimum et le maximum ;
- Représentation graphique en boîte à moustaches (Fig. 171), indiquant la médiane et les deux âges osseux de la population, le minimum et le maximum pour chaque tranche d'âge ;
- Représentation graphique en dispersion de type superpos en nuage de points (Fig. 172), qui montre tous les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge ;
- Représentation graphique en dispersion de type superpos en nuage de points (Fig. 173), qui montre tous les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge chez les filles ;
- Représentation graphique en dispersion de type superpos en nuage de points (Fig. 174), qui montre tous les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge chez les garçons.

Tableau 61 : Les statistiques globales de l'AO

âge osseux en mois	Moyenne	77,22
	Médiane	70,00
	Ecart type	54,281
	Minimum	0
	Maximum	193

Tableau 62 : Les statistiques de l'AO pour chaque tranche d'âge

âge osseux en mois tranche d'âge civil	Moyenne	N	Ecart type	Minimum	Maximum	Médiane
1	7,50	10	4,649	0	14	7,50
2	13,76	17	6,300	5	27	12,00
3	27,88	16	7,822	14	39	28,50
4	45,00	9	9,434	30	61	45,00
5	53,45	11	10,463	38	70	54,00
6	67,00	9	10,943	50	85	68,00
7	89,71	7	6,473	83	99	90,00
8	86,43	7	9,761	78	101	81,00
9	103,15	13	4,413	92	109	104,00
10	114,83	6	9,663	105	132	113,50
11	124,25	8	10,416	109	143	123,00
12	140,57	7	8,696	129	155	142,00
13	148,00	2	4,243	145	151	148,00
14	161,00	5	3,391	158	166	159,00
15	168,33	3	13,614	153	179	173,00
16	175,50	4	4,041	172	181	174,50
17	189,00	4	4,899	183	193	190,00
Total	77,22	138	54,281	0	193	70,00

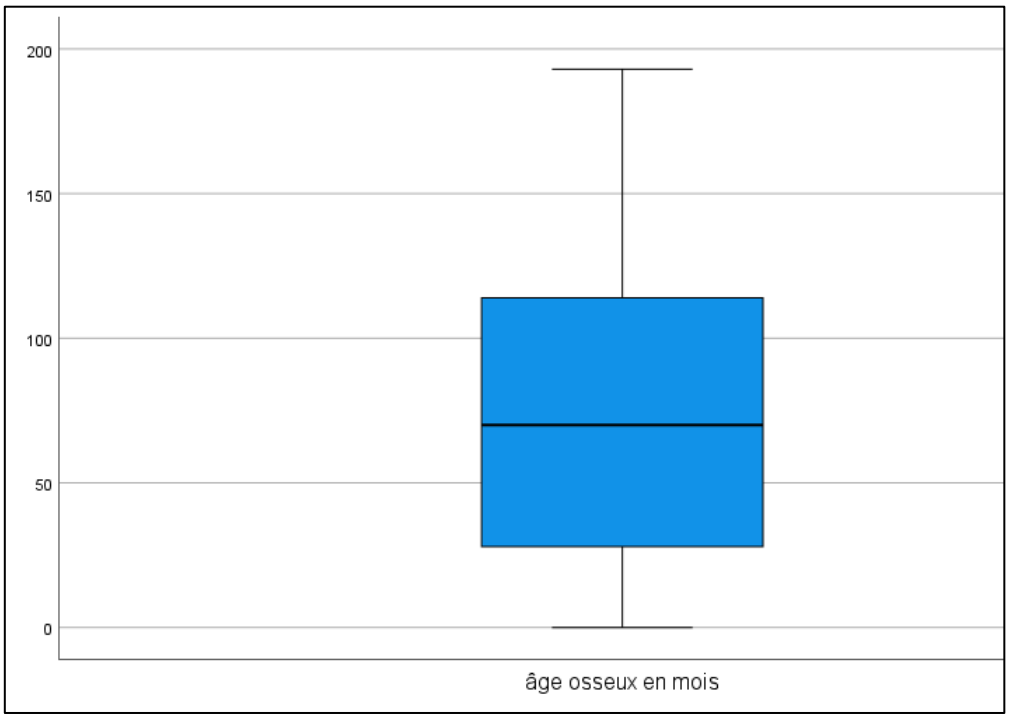


Figure 170 : Les statistiques globales de l'AO
(Représentation graphique en boîte à moustaches)

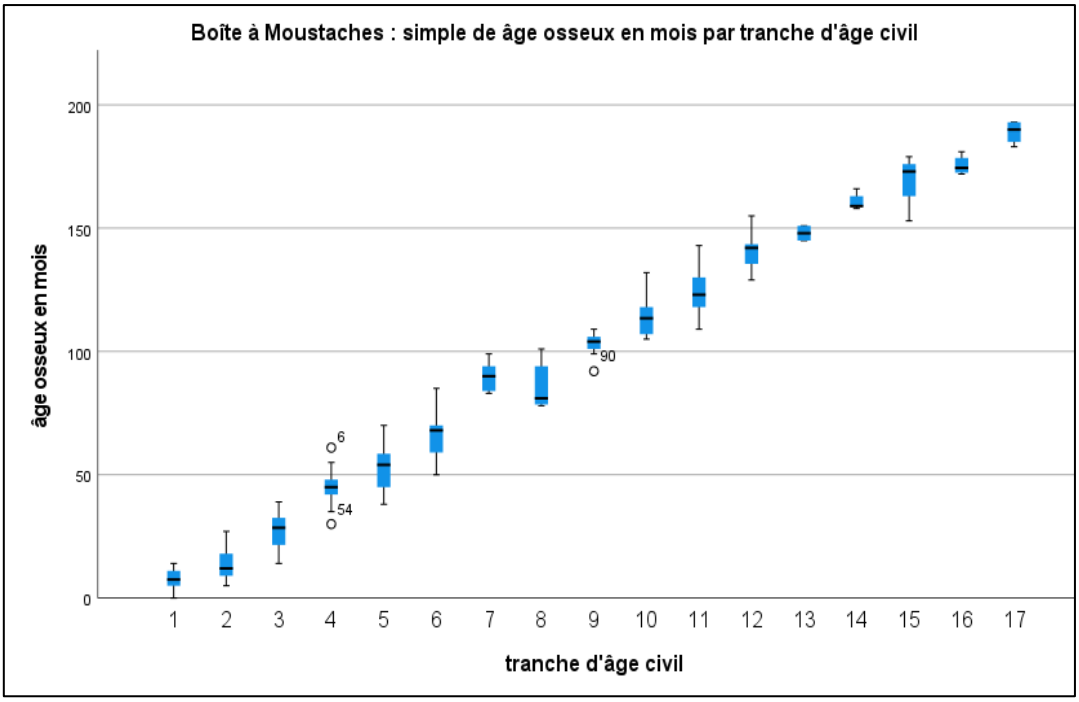


Figure 171 : Les statistiques de l'AO pour chaque tranche d'âge
(Représentation graphique en boîtes à moustaches)

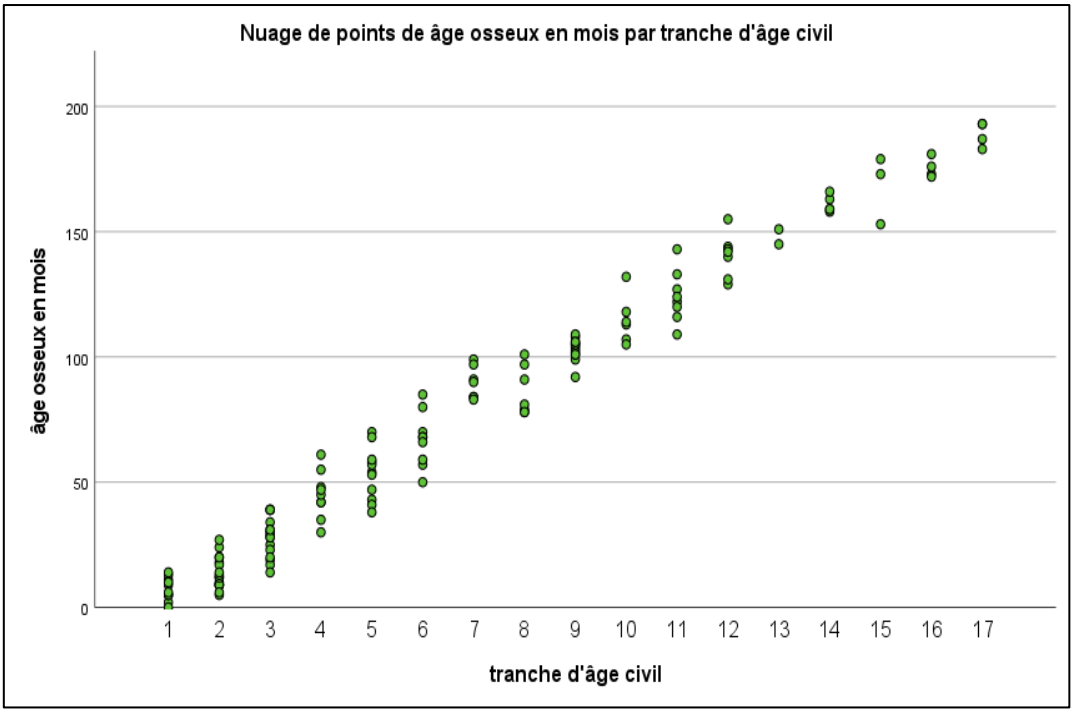


Figure 172 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge
(Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points)

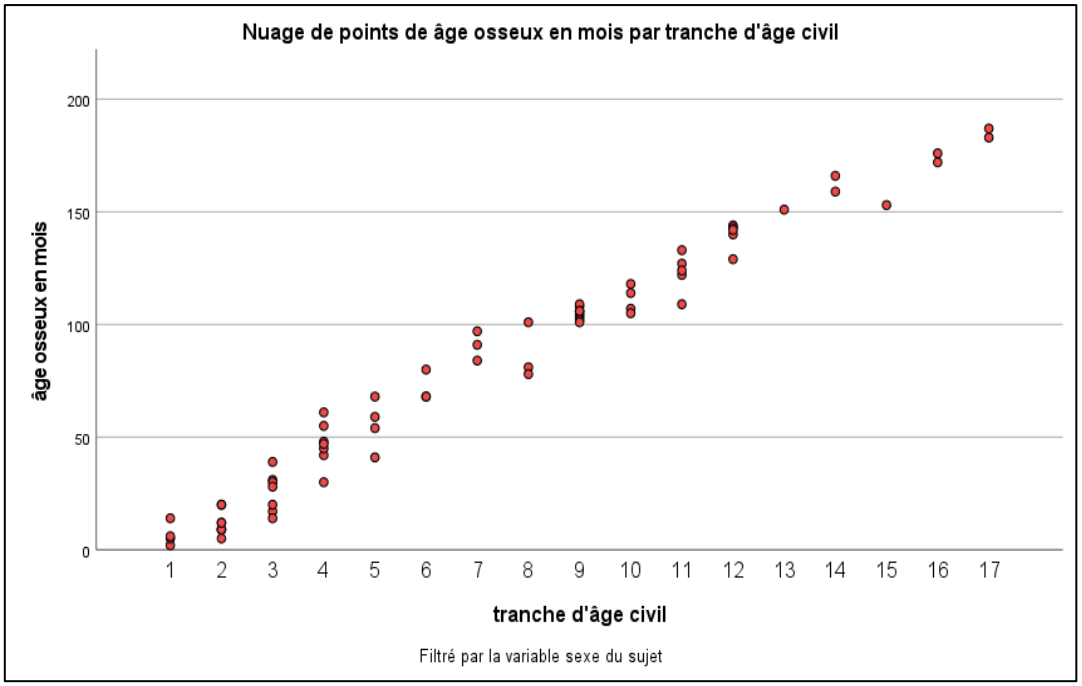


Figure 173 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge, chez les filles (Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points)

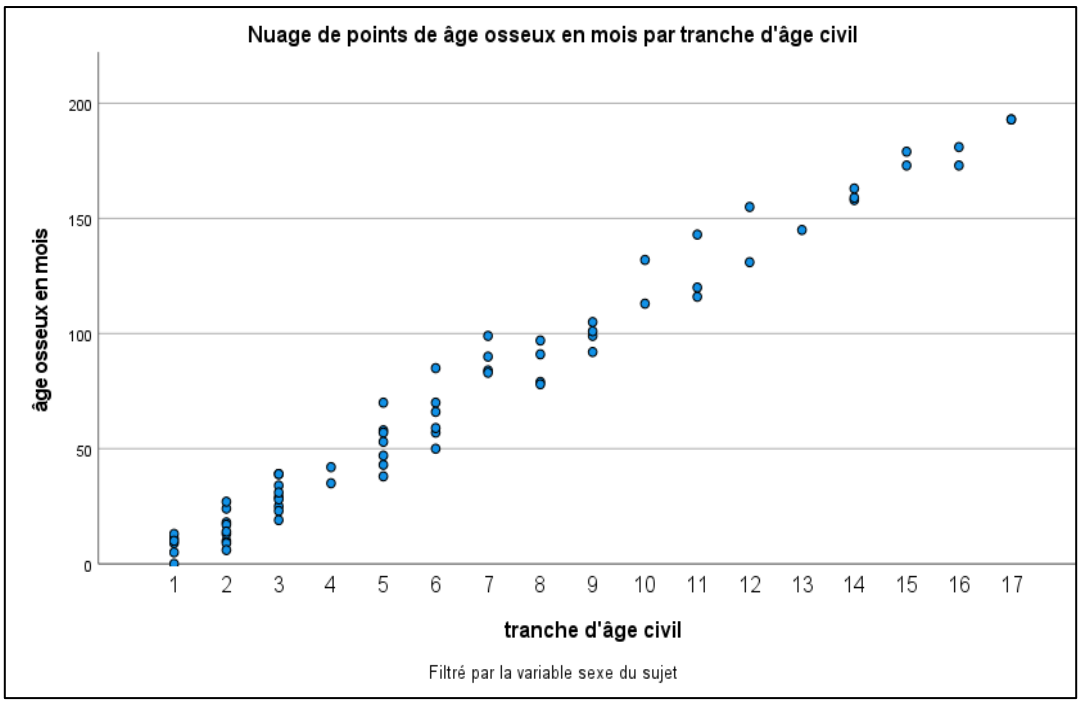


Figure 174 : Les AO qui se trouvent dans chaque tranche d'âge, chez les garçons (Représentation graphique en dispersion de type superpos : nuage de points)

4. La comparaison des moyennes AC et AO :

En premier temps, Nous avons comparé la moyenne des deux âges, le civil et l'osseux, des mêmes individus, du même échantillon, dans le but de vérifier le degré de la similarité des deux âges, civil et osseux, avant même de calculer la corrélation.

On a obtenu le résultat suivant (tab 63) : moyenne AC = 77,05 et moyenne AO = 77,22 donc presque la même moyenne, ce que signifie une très grande similarité des deux âges.

Tableau 63 : La comparaison des moyennes AC et AO

	âge civil en mois	âge osseux en mois
Moyenne	77,05	77,22
N	138	138
Ecart type	55,105	54,281

En deuxième temps, pour confirmation, nous avons appliqué un test statistique de comparaison de moyennes qui est le test de Student ou test-t. Dans ce cas, nous avons procédé à un test-t, dit « pour échantillon unique », et nous avons obtenu le résultat similaire suivant (Tab. 64) : t pour AC = 16,42 et t pour AO = 16,71 et cette quasi-égalité est confirmée par la valeur p < 0,001 pour les deux moyennes.

Tableau 64 : Le test t de Student, pour la comparaison des moyennes AC et AO

	Valeur de test = 0					
	t	df	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance de la différence à 95 % Inférieur	Supérieur
âge civil en mois	16,426	137	<,001	77,051	67,77	86,33
âge osseux en mois	16,711	137	<,001	77,217	68,08	86,35

5. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC, par sexe :

La différence établie entre l'âge osseux et l'âge civil est abrégée en AO-AC, elle se fait par un simple calcul mathématique basique de soustraction : la valeur de l'AO moins (-) la valeur de l'AC, de chaque enfant ou adolescent à part.

Cette différence est un calcul important qui teste la précision de la méthode utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon.

En fait, cette différence reflète l'écart qui peut exister entre l'AC de l'enfant (algérien) et les standards (de la population française) adoptés par la méthode de Sempé qui « dicte » le calcul de l'AO de l'enfant (algérien) : un écart réduit

ou inexistant (= 0) est en faveur de cette fiabilité (c'est-à-dire que les standards de Sempé peuvent être applicables à la population d'étude), et un écart important signifie le contraire.

Bien entendu, l'écart ici peut se voir dans les deux sens, positif et négatif :

- un écart positif, est expliqué par la supériorité de la valeur de l'AO par rapport à l'AC du sujet ;
- un écart négatif, est expliqué par l'infériorité de la valeur de l'AO par rapport à l'AC du sujet.

L'élément considéré dans ce calcul, AO-AC, est la « valeur absolue » de l'écart, c'est à dire sa valeur numérique sans tenir compte de son signe, qu'il soit positif ou négatif.

Du point de vue pratique, en utilisant le logiciel SPSS, nous avons calculé la différence AO-AC à part, puis nous avons additionné ce résultat à la base des données de SPSS, comme « variable » pour l'utiliser par la suite dans nos calculs.

Le tableau ci-après (Tab. 65), calcule la moyenne de la différence AO-AC de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants et les valeurs minimale et maximale. Ces dernières valeurs prouvent que l'AO calculé ne dépasse pas les limites normales conçues, + 2 DS et - 2 DS qui valent 24 mois.

En ci-dessous, un deuxième tableau (Tab. 66) montrant la répartition de la moyenne de la différence AO-AC par rapport aux tranches d'AC, avec leurs ET et leurs valeurs minimales et maximales.

Et plus en dessous, deux représentations graphiques :

- Représentation graphique en courbe (Fig. 175), montrant la fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'AC, et que chaque fois qu'on avance (de tranche) d'âge la différence AO-AC se négative ;
- Représentation graphique en courbe (Fig. 176), montrant la fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'AC, et par sexe ;

Tableau 65 : La moyenne totale de la différence AO-AC, par sexe

différence AOAC en mois					
sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type	Minimum	Maximum
Filles	,09	70	7,954	-16	18
Garçons	,25	68	7,059	-16	16
Total	,17	138	7,499	-16	18

Tableau 66 : La moyenne de la différence AO-AC, par tranches d'âge

différence AOAC en mois

tranche d'âge civil	Moyenne	N	Ecart type	Minimum	Maximum
1	,10	10	3,985	-8	5
2	-2,00	17	4,228	-8	6
3	,00	16	6,303	-10	9
4	2,89	9	8,069	-6	15
5	1,91	11	9,093	-10	16
6	1,67	9	9,165	-12	14
7	11,00	7	5,292	3	18
8	-3,00	7	6,028	-10	6
9	2,31	13	3,881	-4	8
10	2,00	6	7,537	-4	16
11	-,75	8	8,582	-12	13
12	2,00	7	8,699	-14	12
13	-2,00	2	1,414	-3	-1
14	-,40	5	4,827	-6	5
15	-6,33	3	8,737	-16	1
16	-13,25	4	3,202	-16	-10
17	-8,50	4	8,185	-16	0
Total	,17	138	7,499	-16	18

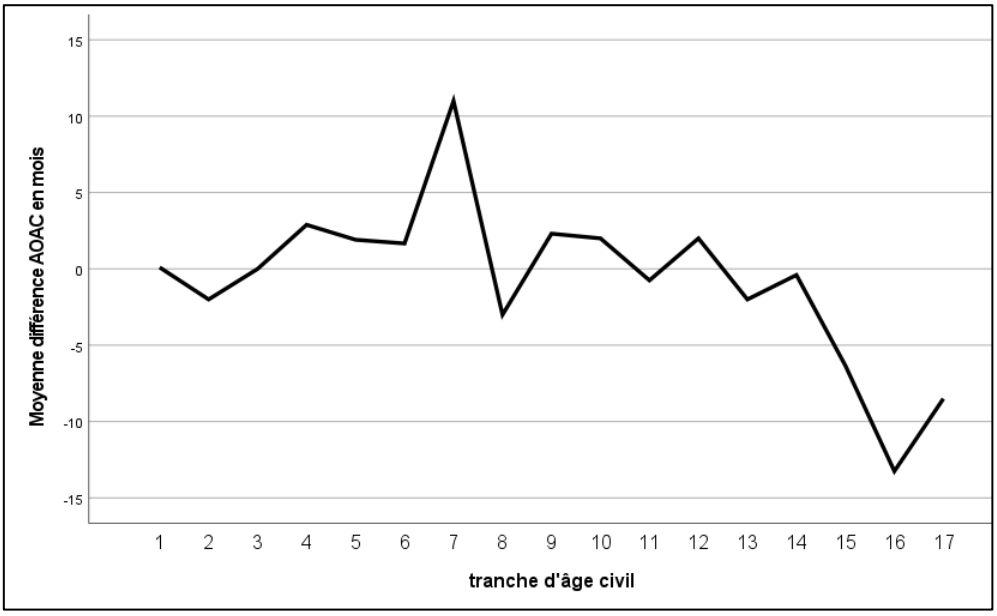


Figure 175 : La fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'AC (Représentation graphique en courbe)

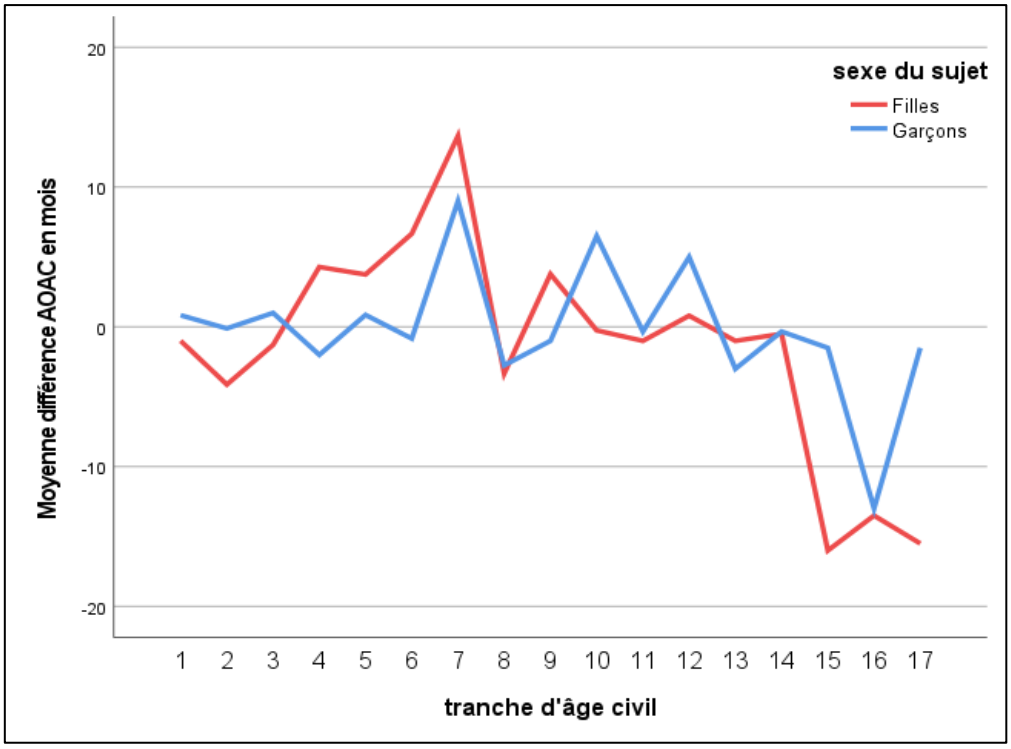


Figure 176 : La fluctuation de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'AC et par sexe
(Représentation graphique en courbe)

6. Le calcul de la corrélation entre AO et AC :

La corrélation entre l'âge osseux et l'âge civil des enfants et des adolescents de l'échantillon est calculable, vérifiable et représentable.

Pour la chercher, nous allons utiliser le test de corrélation, en appliquant précisément la corrélation de Pearson qui utilise des variables quantitatives, qui sont l'AO et l'AC.

La corrélation de Pearson, désignée par un « r », traduit la force de la relation par rapport au chiffre 1 :

- proche de 1 : forte corrélation positive ;
- proche de (-) 1 : forte corrélation négative.

La significativité de cette relation est désignée par « Sig. », c'est la valeur p ou p value. Par défaut, le p doit être < 0,05.

Nous avons calculé le coefficient de corrélation (Corrélation de Pearson) entre les deux variables AO et AC, et aussi le p value (Sig.), et nous avons obtenu les résultats suivants (Tab. 67) :

- La corrélation de Pearson, qui est le coefficient de corrélation (r) est égale à 0,991 donc très proche de 1 (très forte corrélation positive entre l'AO et l'AC de l'échantillon) ;
- Cette très forte corrélation est testée en plus par la p value qui doit être (par défaut) inférieure à 5 % (0,05) ; ici p est < 0,001 marquant la significativité de cette corrélation.

En ci-dessous, trois représentations graphiques de la corrélation : (1) la courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC sans droite de régression (Fig. 177), (2) la courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC avec droite de régression (Fig. 178) et (3) la courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC par sexe, avec droite de régression (Fig. 179).

Tableau 67 : La corrélation de Pearson entre AO et AC

Les 2 étoiles (**) signifient que la corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral), c.-à-d. que dans 99 % des cas ce résultat ne soit pas dû au hasard.

		âge civil en mois	âge osseux en mois
âge civil en mois	Corrélation de Pearson	1	,991**
	Sig. (bilatérale)		<,001
	N	138	138
âge osseux en mois	Corrélation de Pearson	,991**	1
	Sig. (bilatérale)	<,001	
	N	138	138

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

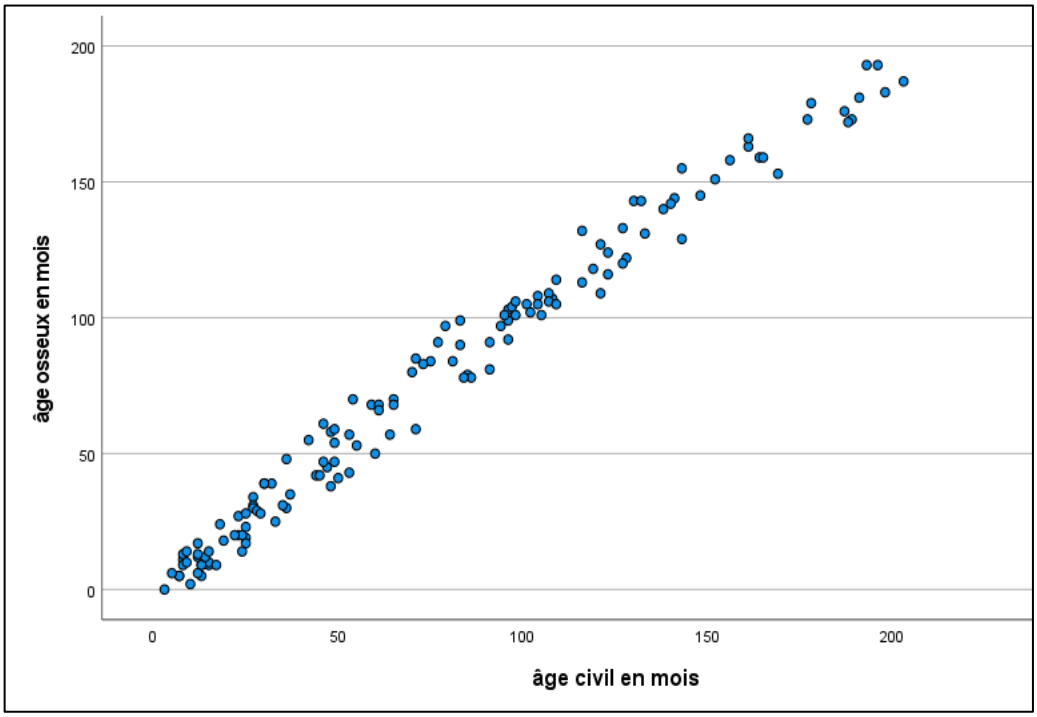


Figure 177 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC sans droite de régression (Représentation graphique en dispersion)

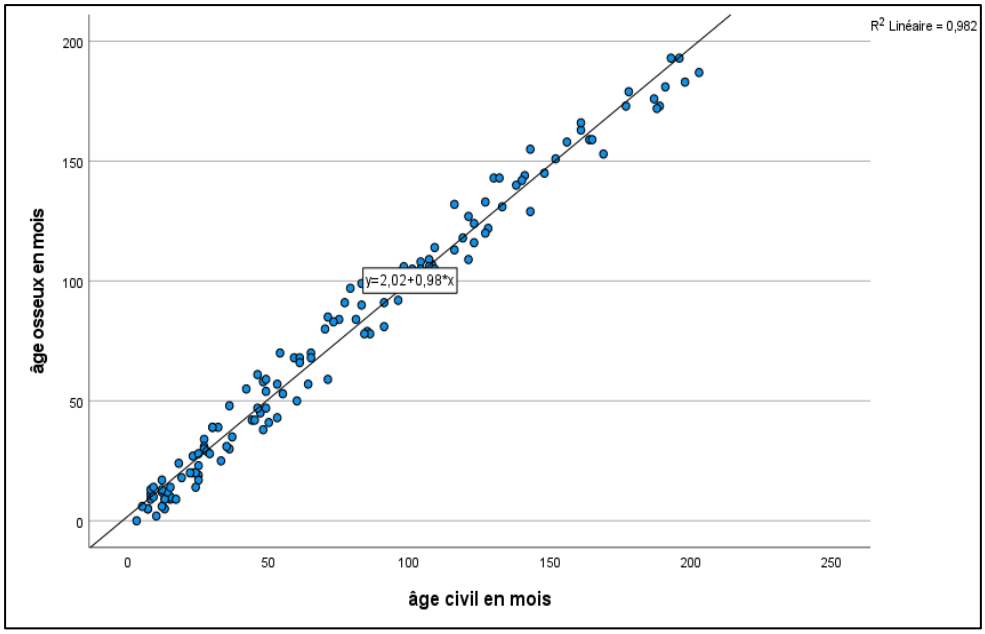


Figure 178 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC avec droite de régression (Représentation graphique en dispersion)

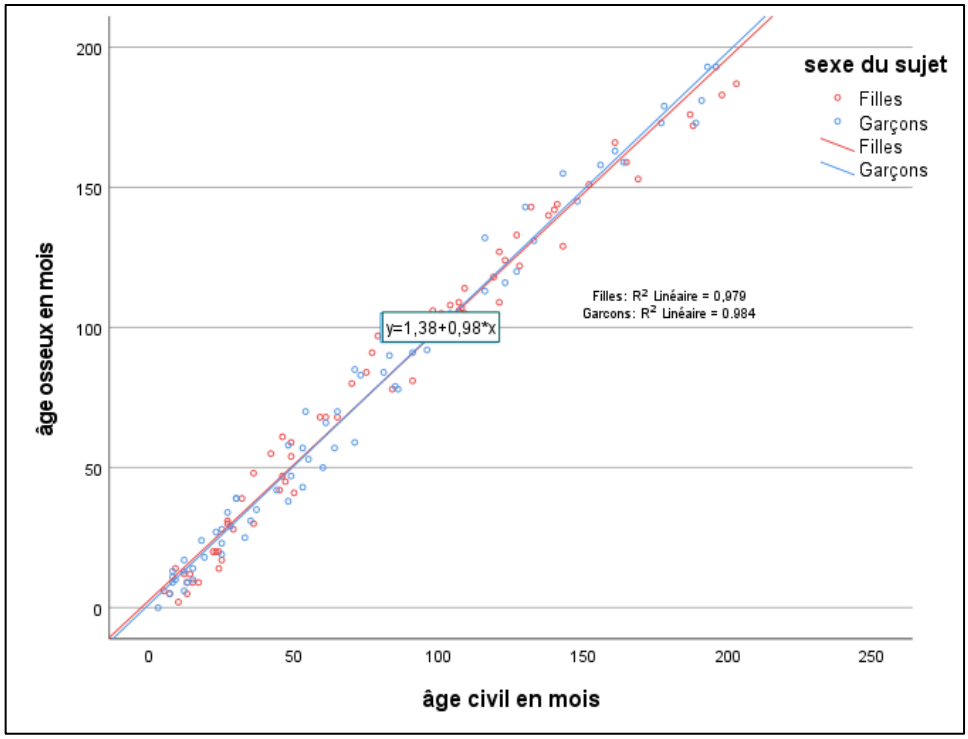


Figure 179 : La courbe de régression de l'AO par rapport à l'AC pour chaque sexe, avec droite de régression

(Représentation graphique en dispersion)

Presque le même coefficient de la variabilité pour les 2 sexes : 0,979 pour filles et 0,984 pour garçons

(B) La variabilité intra-observateur de la lecture de l'âge osseux :

La variabilité de la lecture de l'âge osseux sur le Maturos est un critère qui s'ajoute au critère de corrélation pour vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé.

Pour la mesurer, il faut refaire la lecture de l'AO pour un échantillon limité de clichés radiographiques, 20 % de l'échantillon global (soit 26 clichés), par le même lecteur qui a lu ces clichés précédemment.

Les résultats de cette re-lecture figurent sur le tableau 49 dans le chapitre « Matériel et Méthodes ».

1. Le calcul de la moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité intra-observateur (AOn1), par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 68), calcule la moyenne d'âge de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants.

Et en ci-dessous (Fig. 180), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'âge par sexe.

Tableau 68 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité intra-observateur, par sexe

nouveau AO pour variabilité intra-observateur en mois						
sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type	Minimum	Maximum	Médiane
Filles	82,31	13	61,097	2	178	102,00
Garçons	60,92	13	49,379	5	160	44,00
Total	71,62	26	55,507	2	178	47,50

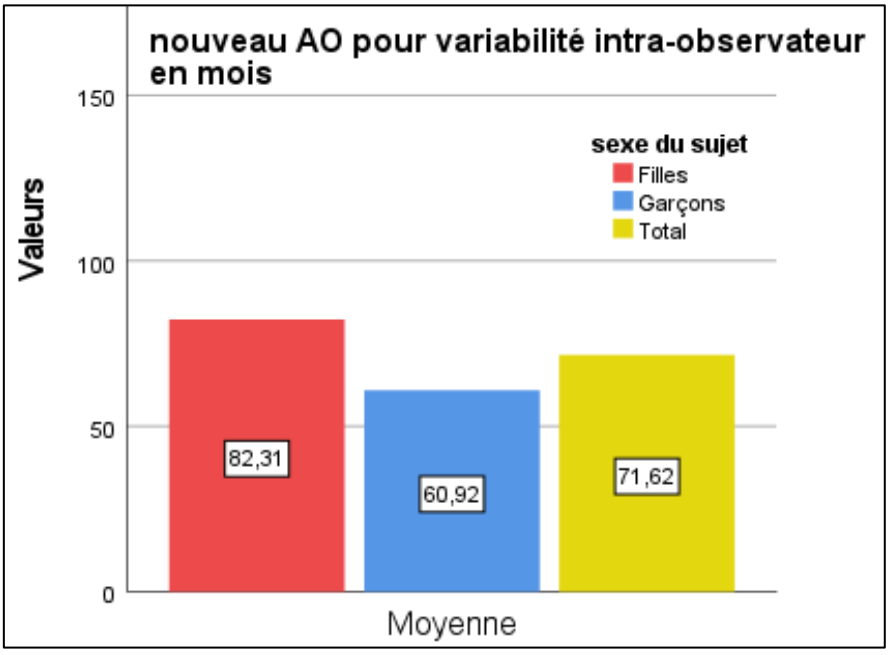


Figure 180 : La moyenne des nouveaux âges osseux, par sexe de la variabilité intra-observateur (Représentation graphique en barres)

2. La comparaison des moyennes des âges osseux, anciens et nouveaux, de la variabilité intra-observateur :

Cette comparaison entre moyennes s'effectue par le test de Student ou test-t. Ce test qui vérifie l'hypothèse d'égalité des moyennes, compare la moyenne des deux âges osseux, le nouveau et l'ancien, des 26 individus, du même échantillon, dans le but de vérifier le degré de la similarité des deux âges osseux.

Dans ce cas, nous procédons à un test-t, dit « pour échantillons appariés », pour obtenir les résultats suivants :

- Presque la même moyenne (Tab. 69) : 70,58 pour AOa et 71,62 pour AOn1 ;
- Un test t en faveur de la non différence des échantillons appariés (t = 1,699) confirmé par la valeur p = 0,102 c.-à-d. plus de 5 %, donc les échantillons AO ancien et AO nouveau sont semblables et non différents (Tab. 70).

Tableau 69 : La comparaison des moyennes des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur

	Moyenne	N	Ecart type
nouveau AO pour variabilité intra-observateur en mois	71,62	26	55,507
âge osseux en mois	70,58	26	56,594

Tableau 70 : Le test t de Student des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur

				Intervalle de confiance de la différence à 95 %				
	Moyenne	Ecart type	Moyenne d'erreur standard	Inférieur	Supérieur	t	df	Sig. (bilatérale)
nouveau AO pour variabilité intra-observateur en mois - âge osseux en mois	1,038	3,117	,611	-,221	2,298	1,699	25	,102

3. Le calcul de la moyenne de la différence entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur, par sexe :

La différence qui peut exister entre le nouvel âge osseux (AOn1) et l'ancien âge osseux (AOa), des 26 clichés radiographiques lus et relus est un calcul important qui teste la précision de la méthode utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon : un écart réduit ou inexistant est en faveur de cette fiabilité, et un écart important signifie le contraire. Cet écart peut se voir dans les deux sens, positif et négatif.

L'élément considéré dans ce calcul, AOn1-AOa, est la « valeur absolue » de l'écart, sans tenir compte de son signe, qu'il soit positif ou négatif.

Du point de vue pratique, en utilisant le logiciel SPSS, nous avons calculé la différence AOn1-AOa à part, puis nous avons ajouté ce résultat à la base des données de SPSS, comme « variable » pour l'utiliser par la suite dans les calculs de variabilité.

En ci-après, le tableau 71 présente la moyenne de la différence AOn1-AOa de l'échantillon choisis, pour les deux sexes, avec leurs ET correspondants.

Tableau 71 : La moyenne de la différence AOn1 et AOa, par sexe

différence AOn1AOa en mois

sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type
Filles	-,54	13	3,045
Garçons	2,62	13	2,364
Total	1,04	26	3,117

4. Le calcul de la corrélation entre AOn1 et AOa :

Arrivant au calcul de la corrélation des nouveaux âges osseux (de la re-lecture intra-observateur) et des anciens âges osseux par le test de corrélation, en appliquant précisément la corrélation de Pearson qui utilise des variables quantitatives.

On peut constater sur le tableau ci-après (Tab. 72), une trop forte corrélation positive entre AOn1 et AOa de l'échantillon choisis :

- La corrélation de Pearson, qui est le coefficient de corrélation (r) est égale à 0,999 donc trop proche de 1 ;
- Cette très forte corrélation est testée en plus par la p value qui doit être (par défaut) inférieure à 5 % (0,05) ; ici p est < 0,001 marquant le niveau élevé de significativité de cette corrélation.

En ci-dessous (Fig. 181), la courbe de régression de l'AOn1 par rapport à l'AOa avec droite de régression.

Tableau 72 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur

		nouveau AO pour variabilité intra-observateur en mois	âge osseux en mois
nouveau AO pour variabilité intra-observateur en mois	Corrélation de Pearson	1	,999**
	Sig. (bilatérale)		<,001
	N	26	26
âge osseux en mois	Corrélation de Pearson	,999**	1
	Sig. (bilatérale)	<,001	
	N	26	138

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

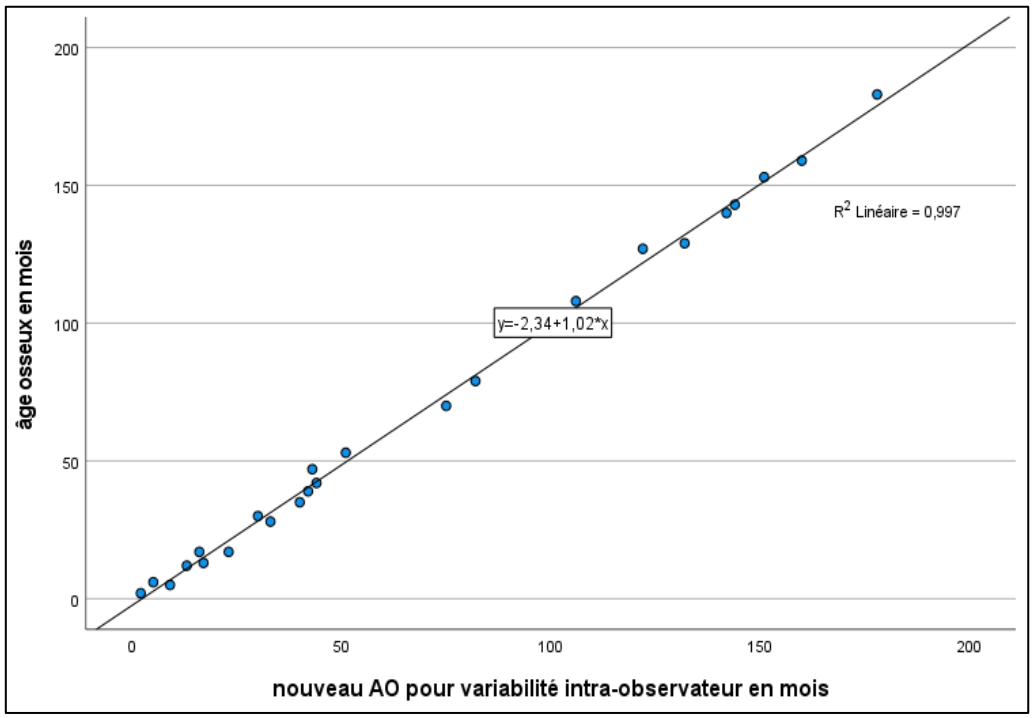


Figure 181 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité intra-observateur
(Représentation graphique en dispersion)

(C) La variabilité inter-observateur de la lecture de l'âge osseux :

Pour mesurer la variabilité inter-observateur (voir : chapitre « Matériel et Méthodes »), il faut aussi refaire la lecture de l'AO pour un échantillon limité de clichés radiographiques, 10 % de l'échantillon global (soit 14 clichés), par un ou deux autres lecteurs (observateurs).

Les résultats de cette re-lecture figurent sur tableau 50 dans le chapitre « Matériel et Méthodes ».

1. Le calcul de la moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur (AOn2), par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 73), calcule la moyenne d'âge de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants.

Et en ci-dessous (Fig. 182), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'âge par sexe.

Tableau 73 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe

nouveau AO pour variabilité inter-observateur en mois

sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type	Médiane	Minimum	Maximum
Filles	52,71	7	41,056	56,00	5	109
Garçons	63,71	7	41,391	71,00	15	116
Total	58,21	14	40,016	56,50	5	116

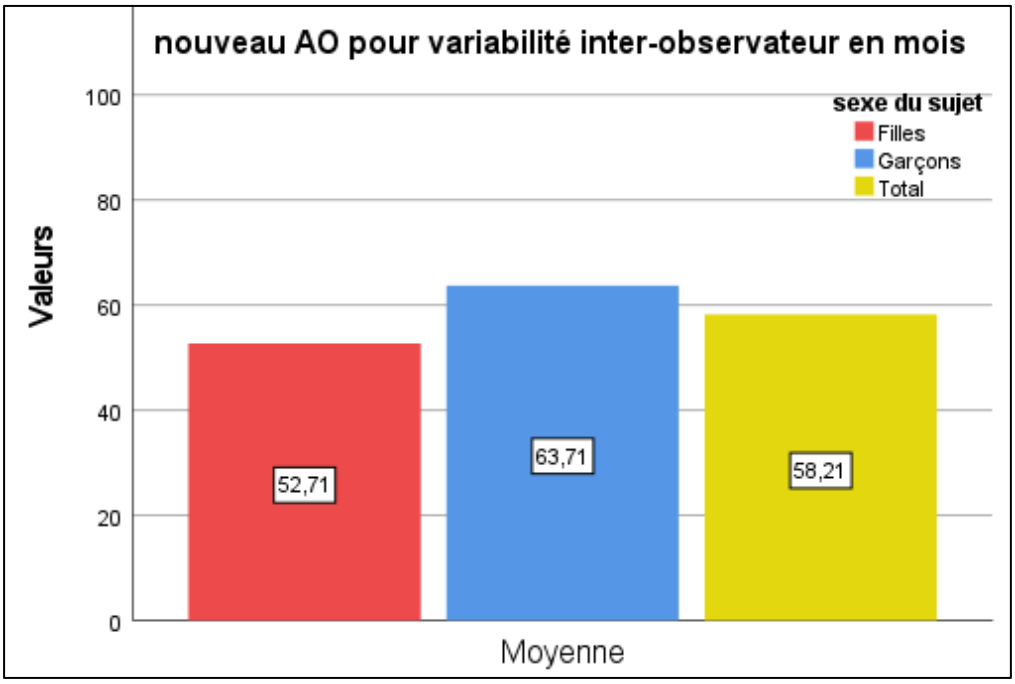


Figure 182 : La moyenne des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe (Représentation graphique en barres)

2. La comparaison des moyennes des âges osseux, anciens et nouveaux, de la variabilité inter-observateur :

Cette comparaison entre moyennes s'effectue par le test de Student ou test-t. Ce test compare la moyenne des deux âges osseux, le nouveau et l'ancien, des 14 individus, du même échantillon, dans le but de vérifier le degré de la similarité des deux âges osseux.

Dans ce cas, nous procédons à un test-t, dit « pour échantillons appariés », pour obtenir les résultats suivants :

- Presque les mêmes moyennes : 59,21 pour AOa et 58,21 pour AOn2 (Tab. 74) ;
- Un test t en faveur de la non différence des échantillons appariés (t = (-) 0,655) confirmé par la valeur p = 0,524 c.-à-d. plus de 5 %, donc les échantillons AO ancien et AO nouveau sont semblables et non différents (Tab. 75).

Tableau 74 : La comparaison des moyennes des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur

	Moyenne	N	Ecart type
nouveau AO pour variabilité inter-observateur en mois	58,21	14	40,016
âge osseux en mois	59,21	14	39,521

Tableau 75 : Le test t de Student des nouveaux et des anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur

	Moyenne	Ecart type	Moyenne d'erreur standard	Intervalle de confiance de la différence à 95 %		t	df	Sig. (bilatérale)
				Inférieur	Supérieur			
nouveau AO pour variabilité inter-observateur en mois - âge osseux en mois	-1,000	5,711	1,526	-4,297	2,297	-,655	13	,524

3. Le calcul de la moyenne de la différence entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur, par sexe :

L'élément considéré dans ce calcul, AOn2-AOa, est la « valeur absolue » de l'écart, sans tenir compte de son signe, qu'il soit positif ou négatif.

Du point de vue pratique, et utilisant le logiciel SPSS, nous avons calculé la différence AOn2-AOa à part, puis nous avons ajouté ce résultat à la base des

données de SPSS, comme « variable » pour l'utiliser par la suite dans les calculs de variabilité.

En ci-après (Tab. 76), le tableau qui présente la moyenne de la différence AOn2-AOa de l'échantillon choisis, pour les deux sexes, avec leurs ET correspondants.

Tableau 76 : La moyenne de la différence AOn2 et AOa, par sexe

différence AOn2AOa en mois			
sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type
Filles	-2,57	7	5,563
Garçons	,57	7	5,827
Total	-1,00	14	5,711

4. Le calcul de la corrélation entre AOn2 et AOa :

Le calcul de la corrélation des nouveaux âges osseux (de la re-lecture inter-observateur) et des anciens âges osseux va appliquer la corrélation de Pearson qui utilise des variables quantitatives.

Le tableau ci-après (Tab. 77), calcule le coefficient de corrélation (de Pearson) entre les deux variables AOn2 et AOa, avec le p value (Sig.), on constate une trop forte corrélation positive entre AOn2 et AOa de l'échantillon choisis :

- La corrélation de Pearson, qui est le coefficient de corrélation (r) est égale à 0,99, donc trop proche de 1 ;
- Cette très forte corrélation est testée en plus par la p value qui doit être (par défaut) inférieure à 5 % (0,05) ; ici p est < 0,001 marquant le niveau de significativité de cette corrélation.

En ci-dessous (Fig. 183), est représentée la courbe de régression de l'AOn2 par rapport à l'AOa avec droite de régression.

Tableau 77 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur

		nouveau AO pour variabilité inter-observateur en mois	âge osseux en mois
nouveau AO pour variabilité inter-observateur en mois	Corrélation de Pearson	1	,990**
	Sig. (bilatérale)		<,001
	N	14	14
âge osseux en mois	Corrélation de Pearson	,990**	1
	Sig. (bilatérale)	<,001	
	N	14	138

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

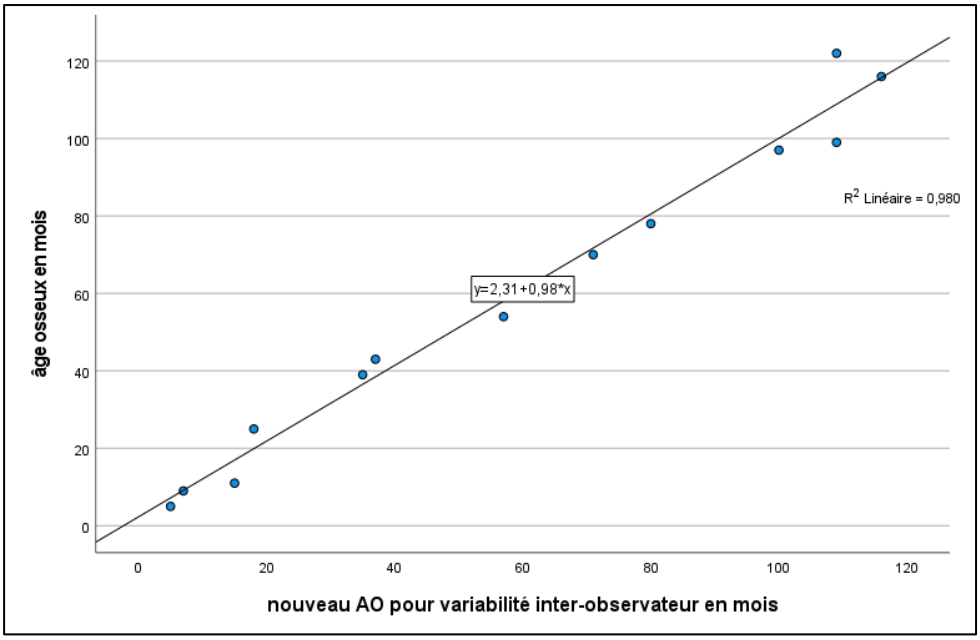


Figure 183 : La corrélation de Pearson entre les nouveaux et les anciens âges osseux de la variabilité inter-observateur
(Représentation graphique en dispersion)

(D) La durée de la lecture Maturos des clichés radiographiques :

Le temps de lecture de l'âge osseux sur le Maturos est un troisième critère qui s'ajoute aux critères précédents (corrélation, variabilité), afin de vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé.

Pour le mesurer (voir : volet « Méthodes »), nous avons utilisé un chronomètre qui est mis en marche au début de l'opération de lecture sur Maturos, puis mis en arrêt à la fin de l'opération.

Pour ce calcul, nous avons profité du même échantillon déjà choisi pour refaire la lecture de l'AO dans le cadre de la variabilité intra-observateur (26 clichés radiographiques), et de la variabilité inter-observateur (14 clichés radiographiques), donc au total nous avont mesuré le temps de lecture de l'AO par le Maturos sur 40 clichés radiographiques.

Les résultats de cette prise du temps figurent sur les deux tableaux de la variabilité intra- et inter-observateur (voir : chapitre « Matériel et Méthodes »).

Nous avons additionné ce résultat à la base des données de SPSS, comme « variables » pour l'utiliser par la suite dans nos calculs.

Le calcul de la durée moyenne de la lecture de Maturos des clichés radiographiques :

Afin de travailler avec des unités homogènes et des valeurs absolues, nous avons converti les durées de lecture en « secondes », au lieu de minutes et secondes.

Sur le SPSS, nous avons procédé au calcul de la moyenne, de la médiane, des valeur minimales et maximales de la durée par sexe, et nous avons obtenu le tableau ci-après (Tab. 78).

La durée moyenne pour la lecture de l'AO sur Maturos ne diffère pas entre lecteurs :

- Elle est de 199,15 secondes (pour même lecteur), soit **3 min** et **20 sec**, et en calculant les ET, on peut délimiter l'intervalle de la durée entre : 2 min et 35 sec – 4 min et 4 sec
- Et elle est de 194,21 secondes (pour lecteurs différens), soit **3 min** et **15 sec**, et en calculant les ET, on peut délimiter l'intervalle de la durée entre : 2 min et 44 sec – 3 min et 45 sec

Tableau 78 : Les statistiques concernant la durée moyenne de lecture Maturos, par sexe

sexe du sujet		temps de lecture du cliché radiographique en secondes intraOb	temps de lecture du cliché radiographique en secondes interOb
Filles	Moyenne	205,77	189,86
	N	13	7
	Ecart type	52,833	31,329
	Médiane	197,00	203,00
	Minimum	136	143
	Maximum	323	220
Garçons	Moyenne	192,54	198,57
	N	13	7
	Ecart type	35,369	31,128
	Médiane	186,00	196,00
	Minimum	120	160
	Maximum	247	243
Total	Moyenne	199,15	194,21
	N	26	14
	Ecart type	44,562	30,342
	Médiane	190,50	199,50
	Minimum	120	143
	Maximum	323	243

(3) L'ÉVOLUTION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE

Si le titre précédent s'intéressait au résultat final de la maturation osseuse qui est l' « âge osseux », le titre présent s'intéressera à l'évolution de cette maturation.
L'évolution de la maturation squelettique est un thème vaste qui, pour le cerner, nous a conduit à suivre les 22 indicateurs osseux (os courts, épiphyses et sésamoïdes) des 138 clichés radiographiques, indicateur après indicateur, (1) dans le but de tracer le schéma d'évolution suivi par cette maturation, (2) à la recherche de quelques indicateurs osseux particuliers qui annoncent et/ou accompagnent la puberté et (3) pour exposer cette évolution sous forme de séquences radiographiques successives et progressives, un Atlas.

(A) Le schéma d'évolution de la maturation squelettique :

Le schéma d'évolution de la maturation squelettique est un « schéma d'ossification » des os courts et des épiphyses du poignet et de la main, depuis leur apparition (début d'ossification) jusqu'à leur terminaison (ossification complète), accompagnés des différentes dates de ces processus.
Pour réaliser ce schéma, il faudra faire un « étalement » du contenu des clichés radiographiques, à la manière « symbolique » de Sempé qui suggérait que « la lecture attentive de plusieurs radiographies du poignet et de la main disposées " séquentiellement ", c'est-à-dire les unes à côté des autres, par âge chronologique croissant, donc sur un négatoscope suffisamment vaste, est la seule manière d'apprécier réellement la valeur des changements d'aspects et de contours que l'on peut observer » [137].
Le but était de déterminer les dates d'apparition et de terminaison des indicateurs osseux de la maturation squelettique de la main et du poignet en post-natal, et de déduire les aspects évolutifs.

1. Comment tracer un « schéma d'ossification » ? :

Sur un tableau long et large nous avons pu rapporter l'évolution de la maturation squelettique depuis les clichés radiographiques.
Ce tableau distingue les garçons des filles, puisqu'ils n'ont pas les mêmes intervalles temporels d'ossification.
De point du vue forme, ce tableau est tracé comme suit (Tab. 79 et 80) :

- Les trois premières lignes du haut : portent les tranches d'âges en (1) années (osseuses), depuis « 0 » année jusqu'aux 16 ans ; et en (2) semestres (en mois), de 0 à 6 mois pour le premier semestre et de 7 à 11 mois pour le deuxième semestre ; elles portent aussi (3) le nombre de sujets (ou de clichés) par rapport à chaque semestre.
  Tracer un tableau pareil en se basant sur l'AO des enfants et des adolescents et non sur leurs âges civils était un choix réfléchi : l'âge

Tableau 79 : Evolution de la maturation squelettique en âge osseux, chez les Filles

(Selon l'ordre de lecture de la méthode de Sempé)

FILLES	Ann. Oss			A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8		A9		A10		A11		A12		A13		A14		A15		A16	
	Semestres	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
	N	4	3	5	3	3	1	3	2	2	2	1	3	1	2	1	1	4	7	4	1	1	3	1	3	1	1	2		1	1	1	1		
CAP		P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	t	t	t	t		t	t	t	t		
HAM		0 A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	t	t	t	t	t		T	T	T	T		
TRI		0	0	0 A	0	0 A	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	P	P t	P t		t	t	T	T		
LUN		0	0	0	0	0	0	A P	0 P	P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	t		t	t	t	t		
SCA		0	0	0	0	0	0	0	0	0 P	A P	P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	P t		t	t	T	T		
TRZ		0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	P	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	P		t	T	t	T		
TRZD		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 P	A	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P		t	t	t	T		
PISI		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 A	0 A	A	P	A P	P	P	P	P T	T		T	T	T	T		
RAD		0	0 A	A P	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P		F	F	F	F		
ULN		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 P	0	A P	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P		F	F	F	F		

M-I	0	0	0	0 A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f		F	F	F	F		
P1-I	0	0	0	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f		F	F	F	F		
P2-I	0 A	0 A	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	F		F	F	F	F		
SSM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	0 P	0	P	T		T	T	T	T		
M-III	0 A	0 P	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f F		F	F	F	F		
M-V	0	0	0 A	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P F		F	F	F	F		
P1-III	0 A	P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f F		F	F	F	F		
P1-V	0 A	0	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F		F	F	F	F		
P2-III	0 A	0 A	0	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f F		F	F	F	F		
P2-V	0	0	0	A	A P	P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	f F		F	F	F	F		
P3-III	0 A	0	0	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F		F	F	F	F		
P3-V	0	0	0	A	A	A	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F		F	F	F	F		
Taux de maturation (en %)	1,41	2,3	3,32	4,9	7,6	8,1	11,23	13,05	15	17,3	19,76	21,1	24,9	26	27,3	29,9	33,47	35,6	37,97	42,6	47,6	48,9	57	69,02	70,8	80,4	89,6		94,8	96,3	98	98,5		

Les abréviations des tableaux (79 et 80)

d'évolution de la maturation squelettique

Les abréviations des indicateurs osseux : (cités par groupes)

(1) **CAP** = capitatum ; **HAM** = hamatum ; **TRI** = triquétrum ; **PISI** = pisiforme ; **LUN** = lunatum ; **SCA** = scaphoïde ; **TRZ** = trapèze ; **TRZD** = trapézoïde

(2) **RAD** = épiphyse distale du radius ; **ULN** = épiphyse distale de l'ulna

(3) **M-I** = épiphyse proximale du 1ier métacarpien ; **P1-I** = épiphyse proximale de la 1ère phalange du pouce ; **P2-I** = épiphyse proximale de la 2ème phalange du pouce ; **SSM** = sésamoïde

(4) **M-III** = épiphyse distale du 3ème métacarpien ; **M-V** = épiphyse distale du 5ème métacarpien ; **P1-III** = épiphyse proximale de la 1ère phalange du médius ; **P1-V** = épiphyse proximale de la 1ère phalange de l'auriculaire ; **P2-III** = épiphyse proximale de la 2ème phalange du médius ; **P2-V** = épiphyse proximale de la 2ème phalange de l'auriculaire ; **P3-III** = épiphyse proximale de la 3ème phalange du médius ; **P3-V** = épiphyse proximale de la 3ème phalange de l'auriculaire

Les abréviations colorées : (états d'ossification)

- Le « **0** » dans une case **grise** : il désigne l'absence du point d'ossification. Il correspond au degré « O » de Sempé ;
- Le « **A** » dans une case **rouge** : il désigne l'apparition du point d'ossification. Il correspond au degré « Q » ou aux demi-degrés « O barré = Ø » et « Q+ » de Sempé ;
- Le « **P** » dans une case **bleu** : il désigne la présence du point d'ossification. Il correspond au degré « P » de Sempé ou aux degrés ultérieurs ;
- Le « **t** » dans une case **verte** : il désigne les phases terminales des os du carpe. Il correspond au degré « S » ou au demi-degré « S+ » de Sempé ;
- Le « **T** » dans une case **mauve** : il désigne la fin d'ossification des os du carpe. Il correspond au degré « T » de Sempé ;
- Le « **f** » dans une case **verte** : il désigne le début de la fusion de l'épiphyse à la diaphyse. Il correspond au degré « S » ou au demi-degré « S+ » de Sempé ;
- Le « **F** » dans une case **mauve** : il désigne la fusion de l'épiphyse à la diaphyse. Il correspond au degré « T » de Sempé ;
- La case en **jaune** : désigne les phases transitoires dans le processus de l'ossification.

Autres abréviations :

- **Ann. Oss :** Année osseuse (année de l'âge osseux) ;
- **A1, A2… A16** : première, deuxième… seizième année
- **S1 :** premier semestre, de 0 à 6 mois ;
- **S2 :** deuxième semestre, de 7 à 11 mois ;
- **N :** nombre de clichés radiographiques par semestre.

Tableau 80 : Evolution de la maturation squelettique en âge osseux, chez les Garçons

(Selon l'ordre de lecture de la méthode de Sempé)

GARÇONS	Ann. Oss.			A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8		A9		A10		A11		A12		A13		A14		A15		A16	
	Semestres	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
	N	3	5	5	2	5	3	4	2	2	4	2	1	1	2	3	2	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1		2	
CAP		0 A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	t	t	t	t		t T	
HAM		0 A	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	t	t	t	t T	T	T		t T	
TRI		0	0 A	0 A	0 A	0	0 A	0 P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	t	t	t	t		t T	
LUN		0	0	0	0	0	0 A	0 A	0 P	0 A	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	t	t		t	
SCA		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 A	P	0	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	t	T		t T	
TRZ		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 A	P	0	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	t	t		t T	
TRZD		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P	0	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P t	t	t		T	
PISI		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	A	A	P	P	P	P	P	T	T		T	
RAD		0	0 A	0 A	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		f	
ULN		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	0 P	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		f	

M-I	0	0	0	0	0	0 A	0 A	0 A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		f	
P1-I	0	0	0	0	0	A P	0 A	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		f F	
P2-I	0	0	0	0 A	A P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		F	
SSM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	A P	0	P	T	T		T	
M-III	0	0	0	0 P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
M-V	0	0	0	0 A	0 P	P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
P1-III	0	0	0	0 P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
P1-V	0	0	0	0 A	A P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
P2-III	0	0	0	0 P	A	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
P2-V	0	0	0	0 A	0	A	0 A	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	F		F	
P3-III	0	0	0	0 P	0 A	A P	A P	A P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		F	
P3-V	0	0	0	0	0	0 A	0 A	0 A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P f	f	f		F	
Taux de maturation (en %)	0,6	1,35	2,06	3,56	4,28	5,93	7,4	9,15	11	13,1	16,65	17,4	20,4	21,5	23,26	25,2	28	30,5	33,5	34,8	36	41,3	41,7	48,9	50,1	61,9	65,9	71	83,25	88,5	90,5		95,8	

osseux « normal » est plus constant dans ses valeurs pendant l'évolution maturative des indicateurs osseux, pas comme l'AC qui est relatif, quelquefois à temps, comme il peut être en avance « normale » ou en recul « normal » par rapport à l'âge osseux, ce qui va décalerait le tableau de l'évolution de la maturation squelettique. L'ossification (âge osseux) est un socle dur, constant et cohérent.

- La colonne à gauche : porte les 22 indicateurs osseux du poignet et de la main, groupés selon l'ordre de lecture de la méthode de Sempé. A titre de rappel : (1) le capitatum, l'hamatum, le triquétrum, le pisiforme, le lunatum, le scaphoïde, le trapèze et le trapézoïde ; (2) le radius et l'ulna ; (3) l'épiphyse proximale du premier métacarpien, l'épiphyse proximale de la 1ère phalange du pouce, l'épiphyse proximale de la 2ème phalange du pouce et l'os sésamoïde ; (4) l'épiphyse distale des métacarpiens III et V, l'épiphyse proximale des 1ères phalanges, des 2èmes phalanges et des 3èmes phalanges des doigts III et V ;
- La dernière ligne en bas : est réservée pour calculer le taux de maturation en pourcentage pour chaque semestre ;
- Le grand milieu du tableau : formé de 748 cases (22 indicateurs x 34 semestres) réservées pour rapporter l'état d'évolution de la maturation des indicateurs osseux à chaque semestre et qui figure sur le compte-rendu n°2 du Maturos.

L'ossification des indicateurs de maturation, sauf le pisiforme et le sésamoïde, évolue par trois stades maturatifs : (1) l'**auxogénèse**, avec ses quatre degrés (sous-stades), Ø (o barré), Q, P et N ; (2) la **morphogénèse**, avec ses trois degrés, M, L et K ; et (3) la **synostogénèse** (ou l'**arthrogénèse**), avec ses trois degrés, R, S et T.

Pour rapporter les états maturatifs des indicateurs sur tableau, sans trop détailler, nous avons choisis uniquement les trois « grandes étapes » d'évolution maturative, l'**apparition**, la **présence** et la **terminaison**, dont on va les mentionner sur tableau comme suit :

- L' « apparition », c'est-à-dire la naissance du point d'ossification, sous forme d'un point flou ou net. Elle correspond aux degrés Ø ou Q, et elle va être mentionnée par la lettre « **A** » et colorée en rouge ;
- La « présence », c'est-à-dire l'existence du point d'ossification qui a duré un certain temps après son apparition, sous forme d'un aspect déjà évolué. Elle correspond au degré P et aux degrés successeurs, et elle va être mentionnée par la lettre « **P** » et colorée en bleu ;
- La « terminaison », c'est-à-dire les phases finales du point d'ossification, qui correspond au degré S (pré-terminal) et degré T (terminal), va être distinguée en deux aspects : celui des os du carpe et du sésamoïde qui sera mentionné par les lettres « **t** » (pré-terminal) et « **T** » (terminal) ; et

celui des épiphyses qui sera mentionné par les lettres « **f** » (pré-fusion) et « **F** » (fusion). Les lettres « t » et « f » seront colorées en vert, et « T » et « F » en mauve ;

- Bien évidemment, l' « absence » du point d'ossification est désignée par un « zéro », coloré en gris ;
- Enfin, les « semestres de transition », c'est-à-dire qui présente deux degrés différents sur deux ou plusieurs clichés du même semestre, sont colorés par le jaune.

La couleur est un « jeu » utilisé souvent en Anatomie, elle éblouit les artistes, attire les apprenants et inspire les scientifiques, et notre résultat final, est un « tableau coloré » sur lequel s'étale l'évolution de la maturation squelettique du poignet et de la main, et à partir duquel nous analyserons cette maturation dans les lignes qui viennent.

2. L'évolution de la maturation squelettique, en général :

La lecture sur tableau de l'évolution de la maturation squelettique de l'ensemble des indicateurs, va dégager plusieurs remarques et conclusions concernant les grandes phases d'évolution, le concours des indicateurs et les intervalles temporels correspondants.

Citons les observations les plus importantes (Tab. 79 et 80) :

- (1) L'évolution de la maturation squelettique passe par quatre phases qui sont, l'absence (en gris), l'apparition (en rouge), la présence (en bleu) et les phases terminales (en vert puis en mauve), ces phases peuvent être intercalées l'une de l'autre, par une phase transitoire (en jaune) qui marque la variabilité individuelle qui peut exister naturellement, entre les individus du même âge (osseux) ;
- (2) La phase bleue, est celle des états maturatifs déjà évolués, de la plupart des indicateurs osseux. Elle forme une « plage » bleue qui se caractérise par (a) sa « stabilité » relative « perturbée » par l'apparition retardée de quelques indicateurs, l'ulna puis le pisiforme puis le sésamoïde… et par (b) sa « longueur » puisqu'elle englobe la plupart des degrés des stades maturatifs : « P, N » de l'auxogénèse, toute la morphogénèse et ses degrés « M, L, K » et le premier degré « R » de la synostogénèse (ou l'arthrogénèse).

  Bien qu'elle soit relativement stable et longue, cette phase de « présence », en fait, est marquée, dans son fond, par des changements multiples volumiques et morphologiques, qui concernent le volume et la forme des indicateurs concernés ;
- (3) L'apparition successive dans le temps des indicateurs osseux, surtout celle des os du carpe, qui couvre une longue période du développement (chez l'enfant) est une constatation frappante. En effet, le suivi de l'évolution de l'ossification, principalement celle des os du carpe, marque

son étalement tout au long de l'enfance jusqu'à l'âge de la puberté, à 9-10 ans chez les filles et à 10-11 ans chez les garçons. La deuxième période du développement (chez l'adolescent) est marquée par les phases terminales ;

- (4) La « naissance » des points d'ossification des indicateurs n'est pas similaire, elle est différée dans le temps. Effectivement, l'apparition de quelques indicateurs est quelquefois précoce, dans la première ou la deuxième année, c'est le cas de triquétrum, radius, deuxième phalange du pouce, et quelques métacarpiens et phalanges des doigts ; quelquefois cette apparition est très précoce, dans les premiers six mois de la vie, c'est le cas de capitatum et hamatum.

  En revanche, l'apparition est quelquefois retardée, vers l'âge de 6-7 ans, comme pour le trapézoïde et ulna ; enfin, cette apparition est quelquefois très en retard, entre 10-12 ans, c'est le cas de pisiforme et sésamoïde ;
- (5) L'intervalle d'apparition et de fermeture (terminaison) des indicateurs osseux diffère beaucoup l'un de l'autre : pour le premier intervalle, il s'étale sur une longue durée qui arrive jusqu'à 11 ans chez les filles et 13 ans chez les garçons ; pour le deuxième intervalle, il s'étale sur une courte durée de 6 ans maximum chez les deux sexes ;
- (6) La plupart des épiphyses de la main, celles des métacarpiens et des phalanges, apparaissent presque ensemble dans le temps, pendant les trois premières années de la vie ; à l'inverse des os court (os du carpe) et des os long (radius et ulna) du poignet qui apparaissent de façon dispersée et discontinue sur plusieurs années ;
- (7) Les indicateurs osseux qui terminent leur ossification au premier sont les épiphyses des métacarpiens et des phalanges, qui fusionnent avec leurs diaphyses à partir de 13 ans chez les filles et 16 ans chez les garçons. Les os du carpe de leur part, commencent à terminer leur ossification à 13 ans aussi chez les filles, et vers 15 ans chez les garçons.

  Concernant les épiphyses du radius et de l'ulna, elles se soudent à 15 ans chez les filles ; chez les garçons, jusqu'à le premier semestre de la 16ème année, nous ne signalons que des traces de fusion qui n'est pas encore complète ;
- (8) Le taux de maturation en pourcentage (voir : dernière ligne des tableaux 79 et 80), est calculer par le logiciel Maturos, et duquel l'AO est fourni. Ce taux évolue progressivement, avec l'avancement de la maturation squelettique, avec un net décalage entre les filles, toujours avancées, et les garçons, dès le premier semestre de la vie (taux fille = 1,41, taux garçon = 0,6) jusqu'à 15-16 ans.

  Nous marquons aussi (Fig. 184), que la première moitié (50 %) du taux de maturation est acquise pendant le deuxième semestre de la 10ème année

d'AO chez les filles, et pendant le premier semestre de la 12ème année d'AO chez les garçons. La deuxième moitié du taux de maturation, est presque acquise dans 5 ans (98,5 %) chez les filles, à la fin de 15 ans d'AO, et dans 4 ans (95,8 %) chez les garçons, au début de 16 ans d'AO.

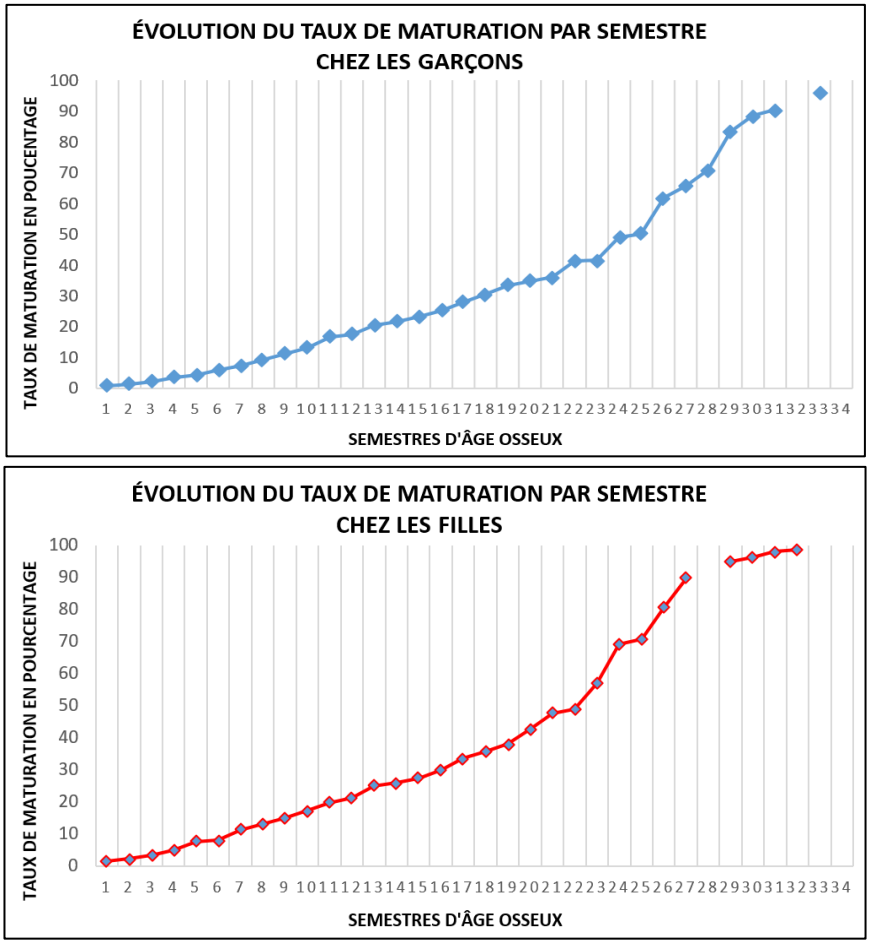


Figure 184 (éditée par Excel) : L'évolution du taux de maturation par semestre, chez les garçons (en haut) et les filles (en bas)
(Présentation graphique en courbe)

- (9) Le phénomène le plus constant de cette évolution est le décalage temporel entre filles/garçons qui se voit partout dans tous les détails de la maturation squelettique : dans l'apparition des indicateurs osseux, dans leur terminaison, dans le taux de maturation, etc… ; ce décalage est toujours en faveur des filles, et il varie entre une et deux année, c'est-à-dire, il ne dépasse pas les 2 années et ne descend pas mois d'une année.

En bref, l'étude générale de la maturation squelettique est riche et vivante, elle est basée sur la notion de l'ossification, et elle suit l'évolution des os du carpe depuis l'apparition de leurs points d'ossification jusqu'à leur inter-articulations, et celle des épiphyses de l'avant-bras, des métacarpiens et des phalanges, depuis l'apparition de leurs points d'ossification jusqu'aux fusions épiphyso-métaphysaires.

3. L'évolution de la maturation squelettique, par indicateur :

Après cette analyse générale de l'évolution de la maturation squelettique, une deuxième analyse plus spécifique, doit s'intéresser à chaque indicateur à part, depuis son apparition jusqu'à son ossification complète ou presque, afin de déterminer les intervalles temporels des phases de chaque indicateur, par sexe (Tab. 79 et 80).

Nous allons noter, tout au long de cet exposé, et de façon constante, le décalage filles/garçons en faveur des filles, sur la quasi-totalité des intervalles d'évolution. Ce décalage est de un an et demi à deux ans, mais il ne descend pas au-dessous d'un semestre, comme il peut dépasser quatre semestres.

Une attention doit être portée sur les trois abréviations qui seront utilisées ci-dessous, pour raccourcir la rédaction et simplifier les données : A (année), S1 (premier semestre) et S2 (deuxième semestre).

- **(1) Le capitatum :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : au 1ier trimestre de la vie postnatale, puisqu'il se voit bien évolué au S1 (1ier semestre) ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : il peut être absent au S1 (premier semestre) comme il peut apparaitre, et il se voit bien évolué au S2 (2ème semestre) ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis S2 (2ème semestre) jusqu'aux A11-S1 (11 ans et 1ier semestre) ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis S2 (2ème semestre) jusqu'aux A13-S1 (13 ans et 1ier semestre) ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A11-S2 (11 ans et 2ème semestre), et reste stagné dans cette phase pour plus de 4 ans et demi (A15-S2) ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A13-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.

  N.B. : La phase terminale de l'os capitatum ne figure pas sur le tableau, pour les filles, apparemment elle est tardive, au-delà des âges disponibles dans l'échantillon.
- **(2) L'hamatum :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : au S1 de la vie postnatale, il peut être absent ou vient d'apparaitre ; au S2, il se voit bien évolué ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : au S1 de la vie postnatale, il peut être absent ou vient d'apparaitre ; au S2, il peut être présent ou vient d'apparaitre ;

- Intervalle de présence constante, chez les filles : à partir de A1-S1 jusqu'aux A10-S2 ;
- Intervalle de présence constante, chez les garçons : à partir de S2 jusqu'à A12-S1 ;
- Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : à partir de A11-S1, jusqu'aux A13-S2 ;
- Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A12-S2 et A16-S1 ;
- Intervalle de la phase terminale, chez les filles : à A13-S2 et A15-S2 ;
- Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1.

- **(3) Le triquétrum :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A1-S1 et A2-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre S2 et A3-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A3-S1 jusqu'aux A13-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A3-S1 jusqu'aux A13-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A11-S2 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A13-S2 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les filles : entre A15-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.
- **(4) Le lunatum :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A3-S1 et A4-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A2-S2 et A4-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A3-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A3-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1.

  N.B. : La phase terminale de l'os lunatum ne figure pas sur le tableau, pour les deux sexes, apparemment elle est tardive, au-delà des âges disponibles dans l'échantillon

- **(5) Le scaphoïde :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A4-S1 et A5-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : à A5-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A4-S1 jusqu'aux A13-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A5-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A12-S2 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les filles : entre A15-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.
- **(6) Le trapèze :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A4-S2 et A5-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : à A5-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A5-S1 jusqu'aux A13-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A5-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A13-S2 et A15-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les filles : entre A14-S2 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.
- **(7) Le trapézoïde :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A4-S2 et A5-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A5-S2 et A6-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A4-S2 jusqu'aux A13-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A6-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les filles : entre A13-S2 et A15-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-terminale, chez les garçons : entre A14-S1 et A15-S2 ;

- Intervalle de la phase terminale, chez les filles : à partir de A15-S2 ;
- Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.

- **(8) Le pisiforme :**

  Le pisiforme est un petit os à courte évolution, qui va parcourir trois phases (la phase pré-terminale n'existe pas) :
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A8-S2 et A10-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A10-S2 et A11-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : est court, il ne dépasse pas deux années, depuis A10-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : est aussi court, il ne dépasse pas trois années, depuis A12-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les filles : entre A12-S2 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A14-S2 et A16-S1.
- **(9) L'épiphyse distale du radius :**
  - Intervalle d'apparition, chez les deux sexes : entre le S2 et A1-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A13-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A2-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A14-S1 et A15-S2 ;

  N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse distale du radius chez les filles ne figure pas sur le tableau, ceci peut être expliqué par le manque de clichés radiographiques de l'échantillon ou par l'apparition fugace de ces épiphyses, c'est-à-dire une apparition rapide qui dure très peu. De même que la phase fusion de l'épiphyse distale du radius chez les garçons ne figure pas sur le tableau, apparemment elle est tardive, au-delà des âges disponibles dans l'échantillon.
- **(10) L'épiphyse distale de l'ulna :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A5-S2 et A7-S1 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A6-S2 et A7-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A5-S2 jusqu'aux A13-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A7-S1 jusqu'aux A14-S1 ;

- Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
- Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A14-S1 et A15-S2 ;

N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse distale de l'ulna chez les filles ne figure pas sur le tableau, apparemment elle est fugace, où elle apparait sans durer longtemps, ou peut-être par manque de clichés. De même que la phase fusion chez les garçons qui n'apparait pas sur tableau, elle serait tardive, au-delà des âges disponibles dans l'échantillon.

- **(11) L'épiphyse proximale du premier métacarpien :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : à A1-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A2-S2 et A3-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A4-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S2 et A15-S2.

  N.B. : La phase fusion de l'épiphyse proximale du premier métacarpien chez les garçons ne figure pas sur le tableau, apparemment elle est tardive, au-delà des âges disponibles dans l'échantillon.

- **(12) L'épiphyse proximale de la 1ère phalange du pouce :**

  Elle présente les mêmes intervalles d'évolution que l'épiphyse précédente, à savoir :
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : à A1-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A2-S2 et A3-S2
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A2-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A16-S1 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S2 et A15-S2 ;

- Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1

- **(13) L'épiphyse proximale de la 2ème phalange du pouce :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : dans les trois premiers semestres de vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A2-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A1-S2 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A2-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : le A12-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.
- **(14) L'os sésamoïde :**

  L'os sésamoïde est comme le pisiforme, c'est un osselet à courte évolution, qui parcourt trois phases et non quatre.
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A11-S1 et A11-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A12-S2 et A13-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : entre A11-S2 et A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : entre A13-S1 et A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase terminale, chez les garçons : entre A14-S2 et A16-S1.
- **(15) L'épiphyse distale du métacarpien III :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : les trois premiers semestres de la vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A2-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A1-S2 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A1-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;

- Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
- Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
- Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.

- **(16) L'épiphyse distale du métacarpien V :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A1-S1 et A1-S2 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A3-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A13-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A2-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.

  N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse distale du métacarpien V chez les filles ne figure pas sur le tableau, ceci peut être expliqué par le manque de clichés radiographiques de l'échantillon ou par l'apparition fugace de ces épiphyses, c'est-à-dire une apparition rapide qui ne dure pas longtemps.
- **(17) L'épiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt III :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : dans les trois premiers semestres de la vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : le A1-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A1-S2 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A1-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.

- **(18) L'épiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt V :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : dans les trois premiers semestres de la vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A2-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A1-S2 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A2-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.

  N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt V chez les filles ne figure pas sur le tableau, ceci peut être expliqué par le manque de clichés radiographiques de l'échantillon ou par l'apparition fugace de ces épiphyses, c'est-à-dire une apparition rapide qui ne dure pas longtemps.
- **(19) L'épiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt III :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : dans les quatre premiers semestres de la vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A2-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A1-S2 jusqu'aux A13-S1 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A1-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.
- **(20) L'épiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt V :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A1-S2 et A3-S1 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A3-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A12-S2 ;

- Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A4-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
- Intervalle de la phase pré-fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A13-S2 ;
- Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A14-S2 ;
- Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
- Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S1 et A16-S1.

- **(21) L'épiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt III :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : dans les quatre premiers semestres de la vie postnatale ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A1-S2 et A3-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A2-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A1-S2 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.

  N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt III chez les filles ne figure pas sur le tableau, ceci peut être expliqué par le manque de clichés radiographiques de l'échantillon ou par l'apparition fugace de ces épiphyses, c'est-à-dire une apparition rapide qui ne dure pas longtemps.
- **(22) L'épiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt V :**
  - Intervalle d'apparition, chez les filles : entre A1-S2 et A3-S1 ;
  - Intervalle d'apparition, chez les garçons : entre A2-S2 et A3-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les filles : depuis A3-S1 jusqu'aux A12-S2 ;
  - Intervalle de présence constante, chez les garçons : depuis A4-S1 jusqu'aux A14-S1 ;
  - Intervalle de la phase pré-fusion, chez les garçons : entre A14-S1 et A15-S2 ;
  - Intervalle de la phase fusion, chez les filles : entre A13-S1 et A15-S2 ;

- Intervalle de la phase fusion, chez les garçons : entre A15-S2 et A16-S1.

N.B. : La phase pré-fusion de l'épiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt V chez les filles ne figure pas sur le tableau, ceci peut être expliqué par le manque de clichés radiographiques de l'échantillon ou par l'apparition fugace de ces épiphyses, c'est-à-dire une apparition rapide qui ne dure pas longtemps.

4. L'évolution de la maturation squelettique, par groupe d'indicateurs :

Les indicateurs osseux du poignet et de la main peuvent être « reclassés » en quelques groupes sur la base de l'évolution de la maturation squelettique.

Six observations méritent d'être évoquées (Tab. 79 et 80) :

- Le capitatum et l'hamatum forment un premier groupe, ils apparaissent d'habitude avec un décalage où le capitatum précède de quelques mois l'hamatum. Ces deux os sont visibles très tôt, au premier semestre de la vie postnatale ; quelquefois chez les filles, le capitatum apparait pendant les trois premiers mois de la vie ; comme aussi quelquefois chez les garçons, l'hamatum apparait pendant le deuxième semestre de la vie ;
- Le scaphoïde, le trapèze et le trapézoïde forment un deuxième groupe, ils apparaissent et évoluent ensemble. Ces trois os apparaissent, entre la 4ème et la 5ème année (osseuse) chez les filles, et entre la 5ème et la 7ème année (osseuse) chez les garçons ;
- Le groupe des os du carpe, forme une entité unique et particulière par le volume de ses os (os courts), leur forme (géométrique), leur disposition (juxtaposé, en deux rangées), leur articulation (plane, pour la plupart), et certainement par leur évolution maturative, puisque leurs points d'ossification apparaissent l'un après l'autre, comme l' « effet domino », à des intervalles différents, depuis le capitatum jusqu'au pisiforme, dessinant une spirale (Fig. 185).
- Le radius et l'ulna se voient écartés l'un de l'autre dans le temps, de 3 ans et demi chez les filles et de 4 ans et demi chez les garçons. L'épiphyse distale du radius apparait tôt chez les deux sexes, entre le 2ème et le 4ème semestre de la vie postnatale ; l'épiphyse distale de l'ulna apparait tardivement chez les deux sexes aussi, entre la 5ème et la 7ème année (osseuse) chez les filles et entre la 6ème et la 7ème année (osseuse) chez les garçons ;
- Sur la colonne du pouce, c'est l'épiphyse de la 2ème phalange qui se voit toujours au premier, dans les trois premiers semestres de la vie postnatale chez les filles, et entre la 1ière et la 2ème année (osseuse) chez les garçons. Les deux autres épiphyses arrivent juste derrière ;

- Le pisiforme et le sésamoïde apparaissent dans une période particulière qui est la période pubertaire, respectivement, à partir de 8 ans et demi et de 11 ans chez les filles, et à partir de 10 ans et demi et de 12 ans et demi chez les garçons. les deux forment, avec une troisième structure osseuse, un groupe dont on peut l'appeler, le groupe des « indicateurs osseux de la puberté » (voir plus bas).

Au total, et après toutes ces explications, se dégagent clairement trois « réalités » à propos de l'évolution de la maturation squelettique :

- La première réalité est la **« richesse »** des indicateurs osseux dans une petite région anatomique telle le poignet et la main, des 33 points d'ossification, uniquement 22 points utilisés, par la méthode de Sempé, dans l'évaluation de l'AO. A cette « richesse » dans le nombre des indicateurs osseux, s'ajoute la « richesse » des informations fournies par chaque indicateur à part ;
- La deuxième réalité est l' **« étalement temporel »** sur une longue durée, depuis la naissance et jusqu'à l'adolescence, des points d'ossification des os du poignet et de la main quant à leur apparition seulement, sans mentionner la deuxième vague d' « étalement temporel » qui se voient lors des modifications volumiques et morphologiques des différentes phases d'évolution, ni la troisième vague qui accompagne la terminaison d'ossification des os du carpe et la fusion des épiphyses ;
- La troisième réalité est le « **décalage** » d'apparition des points d'ossification du poignet et de la main, plus avancé chez les filles que chez les garçons. Ce décalage n'intéresse pas une phase ou une autre de l'évolution maturative, mais décelable durant toute l'évolution où les filles « mûrissent » bien avant les garçons.

5. Les tendances de l'évolution de la maturation squelettique :

La connaissance des intervalles d'évolution de la maturation squelettique des indicateurs osseux du poignet et de la main va nous permettre de suivre les tendances de cette évolution et de dessiner les « trajets multidirectionnels » correspondants qui se résument en cinq (Fig. 185) :

a. Un **trajet spiral** : il concerne l'évolution maturative des os du carpe. Ce trajet est dit anti-horaire, où il débute par le capitatum et se termine au pisiforme, en passant, selon un ordre quasi-constant, par l'hamatum, le triquétrum, le lunatum, le scaphoïde, le trapèze et le trapézoïde.

   Il est à noter que ce trajet « en spiral » qui caractérise l'évolution de la maturation osseuse des os du carpe, et sur lequel Sempé a inspiré l'ordre de lecture de l'AO, est complètement différent de la description anatomique classique du carpe, où il y a deux rangées, proximale et distale, avec un ordre de lecture du côté latéral vers le côté médial.

b. Un **trajet horizontal** : il concerne l'évolution maturative des épiphyses distales des os de l'avant-bras. Ce trajet est latéro-médial, qui débute par le radius et se termine par l'ulna ;
c. Un **trajet longitudinal disto-proximal** : il concerne l'évolution maturative de la colonne du pouce, depuis la phalange distale à la phalange proximale puis au premier métacarpien ;
d. Un **trajet longitudinal disto-proximal** : il concerne l'évolution maturative des quatre derniers doigts, depuis les phalanges proximales vers les métacarpiens ;
e. Un **trajet longitudinal proximo-distal** : il concerne l'évolution maturative des quatre derniers doigts, depuis les phalanges moyennes vers les phalanges distales.

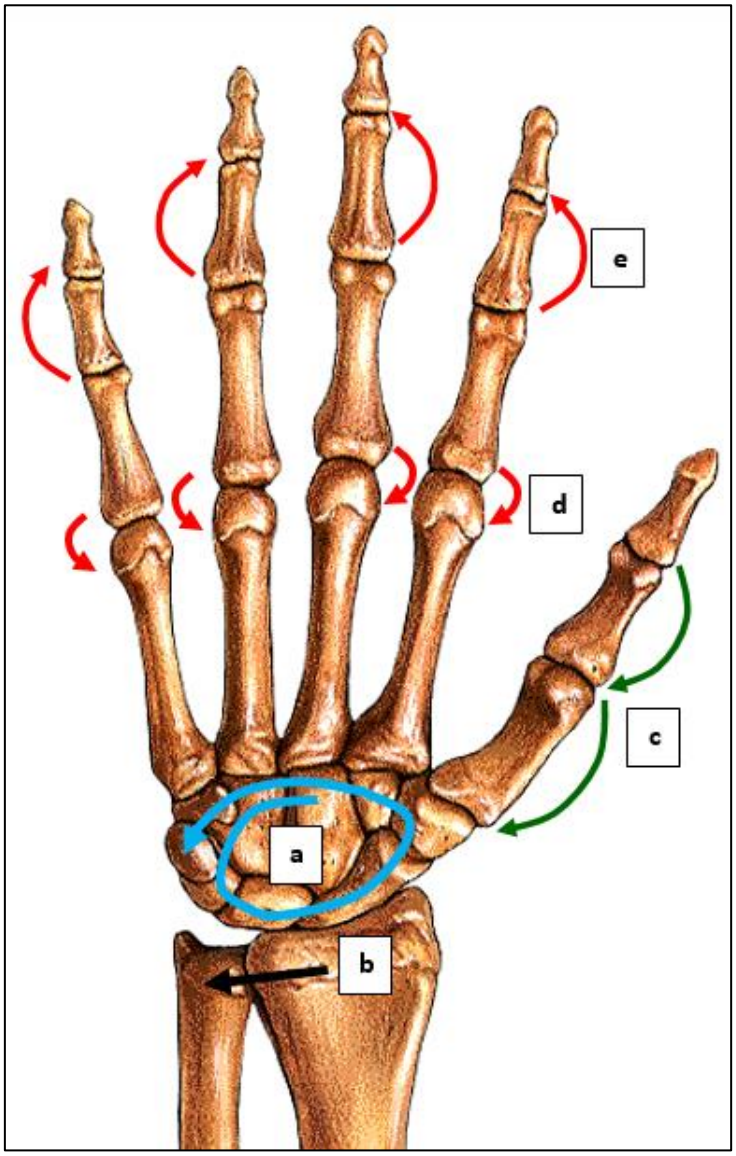


Figure 185 : Les cinq « trajets multidirectionnels » de l'ordre d'apparition des points d'ossification du poignet et de la main

(B) Les critères osseux radiologiques de la puberté :

Les « critères osseux radiologiques de la puberté » sont des indicateurs osseux objectivés radiologiquement et rencontrés au niveau de la main et dont leur « naissance » (apparition) coïncide avec le début de l'âge de la puberté. Ces trois critères osseux sont : (1) l'os pisiforme, (2) l'os sésamoïde du pouce, et (3) l'hamulus de l'os hamatum.

Ces critères anatomo-radiologiques, faciles et pratiques, seront recherchés sur les clichés radiographiques de notre échantillon dans un but de repérer leurs dates d'apparition et les faire correspondre aux dates de déclenchement de la puberté.

Pour mettre ces repères en évidence, nous allons tracer un tableau sur lequel sera dessiné le « schéma d'ossification » des trois principaux indicateurs osseux de la puberté.

Ce schéma d'ossification est tracé de la même manière que celui de l'évolution de la maturation squelettique (voir : Tableaux 81 et 82). Sur ces tableaux, nous avons recherché les différents changements, tels l'apparition et la présence, visibles sur le schéma d'ossification pendant la période pubertaire et leurs intervalles temporels, par sexe et en AC.

Parallèlement à ces tableaux, nous avons utilisé le logiciel SPSS qui va nous permettre de calculer la fréquence d'apparition et de présence des indicateurs osseux de puberté par rapport aux tranches d'âge et aux âges civils des individus. Pour cela, nous avons introduit à la base des données SPSS, comme « variables », les données binaires, absence-présence, de ces indicateurs osseux, pour les utiliser par la suite dans nos calculs.

Rappelons les degrés de maturation, mentionnés sur le compte-rendu n°2 du Maturos, qui correspondent à l'apparition de ces trois critères :

- le degré de maturation de l'os pisiforme est le « Ø » (o barré) ou le « Q » ;
- le degré de maturation de l'os sésamoïde du pouce est le « Ø » (o barré) ou le « Q » ;
- l'apparition de l'hamulus coïncide avec le degré de maturation « K » de l'os hamatum.

1. L'os pisiforme :

Deux grands tableaux permettent de déterminer l'intervalle d'apparition de l'os pisiforme pour chaque sexe :

a. <u>Sur le tableau croisé, os pisiforme x tranches d'âge, Filles (Tab. 83) :</u> la tranche d'âge « 9 » est encadrée, elle correspond aux 50 % de présence de l'os pisiforme chez les filles. Après cette tranche le pisiforme est omniprésent.

b. <u>Sur le tableau croisé, os pisiforme x âge civil, Filles (Tab. 84) :</u> se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'os pisiforme chez les filles. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 96 mois (**8 ans**, **0 mois**), et il devient présent à 100 % à l'âge de 108 mois (**9 ans**, **0 mois**).

Tableau 81 : Evolution des critères osseux radiologiques de la puberté, chez les Filles

FILLES	Ann .Civ			A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8		A9		A10		A11		A12		A13		A14		A15		A16	
	Semestres	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2
	N	1	3	6	2	5	2	3	4	3	1	2	1	2	1	1	2	6	3	3	1	3	2	2	3		1	1	1	1			2	1	1
PISI		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 A	0 A	A	A	P	A P	P	P		P	T	T	T			T	T	T
SSM		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 A	0 P	0 A		P	T	T	T			T	T	T
HML		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 h	0 h	h	h	h	h H	H	H		H	H	H	H			H	H	H

Tableau 82 : Evolution des critères osseux radiologiques de la puberté, chez les Garçons

GARÇONS	Ann. Civ			A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8		A9		A10		A11		A12		A13		A14		A15		A16	
	Semestres	S1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2
	N	1	5	7	2	7	2	1	1	6	1	4	2	1	3	2	2	2	2		2	1	2	1	1	1		2	1		2		2	2	
PISI		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0 A	0	0 A	A	P	P		P	P		P T		T	T	
SSM		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	P	0		0 A	P		P T		P T	T	
HML		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0 h	0	h	h	H	H		H	H		H		H	H	

Les abréviations des tableaux 81 et 82
d'évolution des critères osseux de la puberté

Les abréviations des indicateurs osseux :

(1) **PISI** = pisiforme
(2) **SSM** = sésamoïde
(3) **HML** = hamulus de l'os Hamatum

Les abréviations colorées : (états d'ossification)

- Le « **0** » dans une case **grise** : il désigne l'absence du point d'ossification. Il correspond au degré « O » de Sempé ;
- Le « **A** » dans une case **rouge** : il désigne l'apparition du point d'ossification. Il correspond au degré « Q » ou aux demi-degrés « O barré = Ø » et « Q+ » de Sempé ;
- Le « **P** » dans une case **bleu** : il désigne la présence du point d'ossification. Il correspond au degré « P » de Sempé ou aux degrés ultérieurs ;
- Le « **t** » dans une case **verte** : il désigne les phases terminales des os du carpe. Il correspond au degré « S » ou au demi-degré « S+ » de Sempé ;
- Le « **T** » dans une case **mauve** : il désigne la fin d'ossification des os du carpe. Il correspond au degré « T » de Sempé ;
- Le « **h** » dans une case **orange** : il désigne l'apparition de l'hamulus de l'os hamatum. Il correspond au degré « K » ou au demi-degré « K+ » de Sempé ;
- Le « **H** » dans une case **verte foncée** : il désigne la présence de l'hamulus de l'os hamatum. Il correspond au degré « R » de Sempé ou aux degrés ultérieurs ;
- La case en **jaune** : désigne les phases transitoires dans le processus de l'ossification.

Autres abréviations :

- **Ann. Civ :** Année civile (année de l'âge civil) ;
- **A1, A2… A16** : première, deuxième… seizième année
- **S1 :** premier semestre, de 0 à 6 mois ;
- **S2 :** deuxième semestre, de 7 à 11 mois ;
- **N :** nombre de clichés radiographiques par semestre.

Tableaux 83 et 84 : La fréquence de l'os pisiforme, par tranches d'âge et par AC, chez les filles

sexe du sujet			os pisiforme absence	os pisiforme présence	Total
Filles	tranche d'âge civil	1	4	0	4
		2	8	0	8
		3	7	0	7
		4	7	0	7
		5	4	0	4
		6	3	0	3
		7	3	0	3
		8	3	0	3
		9	5	4	9
		10	0	4	4
		11	0	5	5
		12	0	5	5
		13	0	1	1
		14	0	2	2
		15	0	1	1
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		44	26	70

sexe du sujet			os pisiforme absence	os pisiforme présence	Total
Filles	âge civil en mois	91	1	0	1
		95	1	0	1
		96	0	1	1
		97	0	1	1
		98	2	0	2
		101	1	0	1
		102	1	0	1
		104	0	1	1
		107	1	1	2
		108	0	1	1
		109	0	2	2
		119	0	1	1

a. <u>Sur le tableau croisé, os pisiforme x tranches d'âge, Garçons (Tab. 85) :</u> les tranches d'âge « 10 » et « 11 » sont encadrées, elles correspondent aux 50 % de présence de l'os pisiforme chez les garçons. Après ces tranches le pisiforme est omniprésent.

b. <u>Sur le tableau croisé, os pisiforme x âge civil, Garçons (Tab. 86) :</u> se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'os pisiforme chez les garçons. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 116 mois (**9 ans**, **8 mois**), et il devient présent à 100 % à l'âge de 130 mois (**10 ans**, **10 mois**).

Tableaux 85 et 86 : La fréquence de l'os pisiforme, par tranches d'âge et par AC, chez les garçons

sexe du sujet			os pisiforme absence	os pisiforme présence	Total
Garçons	tranche d'âge civil	1	6	0	6
		2	9	0	9
		3	9	0	9
		4	2	0	2
		5	7	0	7
		6	6	0	6
		7	4	0	4
		8	4	0	4
		9	4	0	4
		10	1	1	2
		11	2	1	3
		12	0	2	2
		13	0	1	1
		14	0	3	3
		15	0	2	2
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		54	14	68

sexe du sujet			os pisiforme absence	os pisiforme présence	Total
Garçons	âge civil en mois	91	1	0	1
		94	1	0	1
		96	2	0	2
		104	1	0	1
		105	1	0	1
		116	1	1	2
		123	1	0	1
		127	1	0	1
		130	0	1	1
		133	0	1	1
		143	0	1	1
		148	0	1	1

2. L'os sésamoïde :

De même, deux tableaux permettent de déterminer l'intervalle d'apparition de l'os sésamoïde pour chaque sexe :

a. Sur le tableau croisé, os sésamoïde x tranches d'âge, Filles (Tab. 87) : les tranches d'âge « 11 » et « 12 » sont encadrées, elles correspondent aux 50 % de présence de l'os sésamoïde chez les filles. Après ces tranches le pisiforme est omniprésent.

b. Sur le tableau croisé, os sésamoïde x âge civil, Filles (Tab. 88) : se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'os sésamoïde chez les filles. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 121 mois (**10 ans**, **1 mois**), et il devient présent à 100 % à l'âge de 152 mois (**12 ans**, **8 mois**).

Tableaux 87 et 88 : La fréquence de l'os sésamoïde, par tranches d'âge et par AC, chez les filles

sexe du sujet			os sésamoïde absence	os sésamoïde présence	Total
Filles	tranche d'âge civil	1	4	0	4
		2	8	0	8
		3	7	0	7
		4	7	0	7
		5	4	0	4
		6	3	0	3
		7	3	0	3
		8	3	0	3
		9	9	0	9
		10	4	0	4
		11	3	2	5
		12	3	2	5
		13	0	1	1
		14	0	2	2
		15	0	1	1
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		58	12	70

sexe du sujet			os sésamoïde absence	os sésamoïde présence	Total
Filles	âge civil en mois	108	1	0	1
		109	2	0	2
		119	1	0	1
		121	1	1	2
		123	1	0	1
		127	0	1	1
		128	1	0	1
		132	0	1	1
		138	1	0	1
		140	0	1	1
		141	1	0	1
		143	1	0	1
		152	0	1	1
		161	0	1	1
		165	0	1	1

c. Sur le tableau croisé, os sésamoïde x tranches d'âge, Garçons (Tab. 89) : les tranches d'âge « 12 » « 13 » et « 14 » sont encadrées, elles correspondent aux 50 % de présence de l'os sésamoïde chez les garçons. Après ces tranches l'os sésamoïde est omniprésent.

d. Sur le tableau croisé, os sésamoïde x âge civil, Garçons (Tab. 90) : se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'os sésamoïde chez les garçons. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 143 mois (**11 ans**, **11 mois**), et il devient présent à 100 % à l'âge de 164 mois (**13 ans**, **8 mois**).

Tableaux 89 et 90 : La fréquence de l'os sésamoïde, par tranches d'âge et par AC, chez les garçons

sexe du sujet			os sésamoïde absence	os sésamoïde présence	Total
Garçons	tranche d'âge civil	1	6	0	6
		2	9	0	9
		3	9	0	9
		4	2	0	2
		5	7	0	7
		6	6	0	6
		7	4	0	4
		8	4	0	4
		9	4	0	4
		10	2	0	2
		11	3	0	3
		12	1	1	2
		13	1	0	1
		14	1	2	3
		15	0	2	2
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		59	9	68

sexe du sujet			os sésamoïde absence	os sésamoïde présence	Total
Garçons	âge civil en mois	127	1	0	1
		130	1	0	1
		133	1	0	1
		143	0	1	1
		148	1	0	1
		156	0	1	1
		161	1	0	1
		164	0	1	1
		177	0	1	1
		178	0	1	1

3. L'hamulus de l'os hamatum :

Deux tableaux permettent la détermination de l'intervalle d'apparition de l'hamulus de l'os hamatum pour chaque sexe :

a. Sur le tableau croisé, hamulus x tranches d'âge, Filles (Tab. 91) : la tranche d'âge « 9 » est encadrée, elle correspond à plus de 50 % de présence de l'hamulus chez les filles. Après cette tranche l'hamulus est omniprésent.

b. Sur le tableau croisé, hamulus x âge civil, Filles (Tab. 92) : se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'hamulus chez les filles. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 96 mois (**8 ans**, **0 mois**), et il devient présent à 100 % à l'âge de 102 mois (**8 ans**, **6 mois**).

Tableaux 91 et 92 : La fréquence de l'hamulus, par tranches d'âge et par AC, chez les filles

sexe du sujet			hamulus de l'os hamatum absence	hamulus de l'os hamatum présence	Total
Filles	tranche d'âge civil	1	4	0	4
		2	8	0	8
		3	7	0	7
		4	7	0	7
		5	4	0	4
		6	3	0	3
		7	3	0	3
		8	3	0	3
		9	3	6	9
		10	0	4	4
		11	0	5	5
		12	0	5	5
		13	0	1	1
		14	0	2	2
		15	0	1	1
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		42	28	70

sexe du sujet			hamulus de l'os hamatum absence	hamulus de l'os hamatum présence	Total
Filles	âge civil en mois	84	1	0	1
		91	1	0	1
		95	1	0	1
		96	0	1	1
		97	1	0	1
		98	1	1	2
		101	1	0	1
		102	0	1	1
		104	0	1	1
		107	0	2	2
		108	0	1	1
		109	0	2	2

c. <u>Sur le tableau croisé, hamulus x tranches d'âge, Garçons (Tab. 93) :</u> les tranches d'âge « 10 » et « 11 » sont encadrées, elles correspondent aux 50 % de présence de l'hamulus chez les garçons. Après cette tranche l'hamulus est omniprésent.

d. <u>Sur le tableau croisé, hamulus x âge civil, Garçons (Tab. 94) :</u> se trouve le détail des âges en mois de l'apparition de l'hamulus chez les garçons. Cet os commence à apparaitre à l'âge de 116 mois (**9 ans**, **8 mois**) et il devient présent à 100 % à l'âge de 127 mois (**10 ans**, **7 mois**).

Tableaux 93 et 94 : La fréquence de l'hamulus, par tranches d'âge et par AC, chez les garçons

sexe du sujet			hamulus de l'os hamatum absence	hamulus de l'os hamatum présence	Total
Garçons	tranche d'âge civil	1	6	0	6
		2	9	0	9
		3	9	0	9
		4	2	0	2
		5	7	0	7
		6	6	0	6
		7	4	0	4
		8	4	0	4
		9	4	0	4
		10	1	1	2
		11	1	2	3
		12	0	2	2
		13	0	1	1
		14	0	3	3
		15	0	2	2
		16	0	2	2
		17	0	2	2
	Total		53	15	68

sexe du sujet			hamulus de l'os hamatum absence	hamulus de l'os hamatum présence	Total
Garçons	âge civil en mois	96	2	0	2
		104	1	0	1
		105	1	0	1
		116	1	1	2
		123	1	0	1
		127	0	1	1
		130	0	1	1
		133	0	1	1
		143	0	1	1

En résumé, un tableau de comparaison des dates d'apparition et de présence des indicateurs osseux de puberté (Tab. 95) :

Tableau 95 : Le tableau récapitulatif sur les dates d'apparition des indicateurs osseux de la puberté, chez les deux sexes

	Date d'apparition		Date de présence	
	Filles	**Garçons**	**Filles**	**Garçons**
Os pisiforme	8 ans 0 mois	9 ans 8 mois	9 ans 0 mois	10 ans 10 mois
Os sésamoïde	10 ans 1 mois	11 ans 11 mois	12 ans 8 mois	13 ans 8 mois
Hamulus de l'os hamatum	8 ans 0 mois	9 ans 8 mois	8 ans 6 mois	10 ans 7 mois

Avec **quatre remarques importantes** :

- La grande similarité des dates d'apparition et de présence entre l'os pisiforme et l'hamulus de l'os hamatum ;
- Les premiers critères osseux qui apparaissent sont le pisiforme et l'hamulus de l'hamatum, puis le sésamoïde les rejoins après 2 ans et 1 mois de décalage chez les filles, 2 ans 3 mois chez les garçons ;
- La coïncidence parfaite des dates d'apparition des trois indicateurs osseux et des dates du début de la puberté, que ce soit chez les filles (8-13 ans) ou chez les garçons (9-14 ans) ; il semblerait que ces trois critères « naissent » avec le déclenchement de la puberté, que ce soit à la date minimale de l'intervalle (8 ans : filles ; 9 ans : garçons) le cas du pisiforme et de l'hamulus, ou à la date maximale de l'intervalle (13 ans : filles ; 14 ans : garçons) le cas du sésamoïde ;
- Le décalage filles/garçons est remarquable dans ces dates, en faveur d'une avance féminine. Ce décalage oscille entre 1 an (os sésamoïde) et 2 ans 1 mois (hamulus).

(C) L'Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique :

L' « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » proposé, est le résultat ultime de l'étude de l'évolution de cette maturation.

Notre étude, qui s'est basée sur un travail acharné, trouve utile et créatif d'assembler les clichés radiographiques les plus représentatifs, de les ordonner selon le trajet parcouru par la maturation osseuse… afin de produire un « Atlas ».

En fait, trois motifs nous ont motivé à proposer cet Atlas, le premier était de valoriser l'étude par une édition pareille, le deuxième était d'illustrer les tableaux d'évolution de la maturation squelettique en leur joignant des clichés radiographiques correspondants et le troisième était d'exposer de façon arrangée, une partie de la collection de clichés radiographiques que nous disposons.

Ce travail commencera par la détermination des tranches d'âge (osseux) successives, par semestre et par sexe sur un tableau listing (Tab. 96), sur lequel nous indiquons les clichés radiographiques choisis sur la base de la « représentabilité » par rapport à la tranche d'âge et par rapport au sexe.

Les deux critères de choix de la sélection des clichés radiographiques sont :

- La bonne corrélation de l'AO à l'AC, c'est-à-dire une différence AO - AC la plus basse parmi les clichés du même âge ; en cas d'écart AO-AC dépassant les 10 mois, nous vérifierons l'ET fourni par Maturos qui ne doit pas dépasser le 2,0 ;
- La qualité du cliché radiographique (cliché numérique).

Nous avons obtenu le résultat suivant sous forme d'un tableau listing qui représente la collection des reproductions, masculines et féminines, qui seront insérées dans l'Atlas anatomo-radiologique :

Tableau 96 : Les clichés radiographiques choisis pour l'édition de l'Atlas anatomo-radiologique

[A : année ; S : semestre ; ND : (cliché) non disponible]

Séquences masculines				**Séquences féminines**		
n° dossier	**AO** (années, mois)	**AO-AC** (en mois)	**Tranches d'âge**	**n° dossier**	**AO** (années, mois)	**AO-AC** (en mois)
115/2015	6 mois	- 6	**S1**	020/2014	5 mois	- 2
044/2014	11 mois	3	**S2**	011/2013	9 mois	- 6
056/2014	1 an, 1 mois	5	**A1-S1**	013/2014	1 an, 0 mois	0
021/2014	1 an, 11 mois	- 2	**A1-S2**	064/2014	1 an, 8 mois	- 3
014/2014	2 ans, 1 mois	- 8	**A2-S1**	038/2014	2 ans, 6 mois	3
076/2013	2 ans, 11 mois	- 2	**A2-S2**	033/2014	2 ans, 7 mois	4
023/2014	3 ans, 3 mois	9	**A3-S1**	018/2014	3 ans, 6 mois	- 3
028/2014	3 ans, 7 mois	- 10 (ET = - 1,2)	**A3-S2**	053/2014	3 ans, 9 mois	- 2
012/2014	4 ans, 2 mois	10 (ET = - 1,1)	**A4-S1**	007/2013	4 ans, 6 mois	5
037/2014	4 ans, 9 mois	4	**A4-S2**	112/2015	4 ans, 7 mois	13 (ET = 1,6)
117/2015	5 ans, 6 mois	5	**A5-S1**	006/2013	5 ans, 1 mois	15 (ET = 1,5)
032/2014	5 ans, 10 mois	5	**A5-S2**	049/2014	5 ans, 8 mois	3
034/2014	6 ans, 6 mois	- 8	**A6-S1**	118/2015	6 ans, 6 mois	- 6
005/2013	6 ans, 7 mois	- 6	**A6-S2**	022/2014	6 ans, 8 mois	10 (ET = 0,8)
042/2014	7 ans, 1 mois	14 (ET =1,3)	**A7-S1**	050/2014	7 ans, 0 mois	9
090/2014	7 ans, 8 mois	- 4	**A7-S2**	080/2014	7 ans, 7 mois	14 (ET = 1,3)
040/2014	8 ans, 3 mois	3	**A8-S1**	036/2014	8 ans, 1 mois	18 (ET = 1,9)
075/2014	8 ans, 9 mois	1	**A8-S2**	016/2014	8 ans, 11 mois	- 1
065/2014	9 ans, 5 mois	- 3	**A9-S1**	026/2014	9 ans, 1 mois	2
039/2014	9 ans, 8 mois	- 7	**A9-S2**	069/2014	9 ans, 10 mois	- 1
107/2015	10 ans, 0 mois	- 7	**A10-S1**	027/2014	10 ans, 2 mois	- 6
128/2024	10 ans, 11 mois	- 2	**A10-S2**	041/2014	10 ans, 9 mois	- 14 (ET = 1,6)
031/2014	11 ans, 0 mois	16 (ET = 1,7)	**A11-S1**	017/2014	11 ans, 1 mois	6
114/2015	11 ans, 11 mois	13 (ET = 1,5)	**A11-S2**	123/2023	11 ans, 11 mois	11 (ET = 1,7)
113/2015	12 ans, 1 mois	- 3	**A12-S1**	093/2014	12 ans, 0 mois	3
121/2023	12 ans, 11 mois	12 (ET = 1,7)	**A12-S2**	127/2024	12 ans, 7 mois	- 1
025/2014	13 ans, 2 mois	2	**A13-S1**	133/2024	13 ans, 2 mois	- 3
131/2024	13 ans, 7 mois	2	**A13-S2**	ND		

126/2024	14 ans, 5 mois	- 4	**A14-S1**	135/2024	14 ans, 4 mois	- 16 (ET = 1,6)
130/2024	14 ans, 11 mois	- 1	**A14-S2**	136/2024	14 ans, 8 mois	- 11 (ET = 0,9)
124/2024	15 ans, 1 mois	- 10 (ET = - 1,0)	**A15-S1**	122/2023	15 ans, 3 mois	- 15 (ET = 1,5)
ND			**A15-S2**	138/2024	15 ans, 7 mois	- 16 (ET = 1,9)
129/2024	16 ans, 1 mois	- 3	**A16-S1**	ND		
ND			**A16-S2**	ND		

Cet Atlas englobera 63 séquences radiographiques, 32 masculines et 31 féminines [Avec 5 reproductions manquantes : 2 masculines et 3 féminines].

Enfin, préfacé, illustré et organisé, l' « ATLAS » occupera les soixante-neuf dernières pages de ce présent chapitre « RÉSULTATS ».

(3) LES CORRÉLATIONS DE L'AGE OSSEUX

Les corrélations de l'âge osseux sont des aspects relationnels qui intéressent la maturation squelettique par ses rapports avec des paramètres de croissance, ou apparentés à la croissance.
Parmi ces paramètres, il y a deux : l'indice de masse corporelle, abrégé en IMC, et le statut socio-économique, abrégé en SSE.
Les corrélations de l'AO avec ces facteurs sont des relations qui peuvent être testées et prouvées statistiquement par le Logiciel SPSS.
Dans cette optique, le SPSS va effectuer plusieurs opérations qui permettent de tester les corrélations de l'AO avec les paramètres IMC et SSE.
Il est à noter que ces deux facteurs ont été déjà traités, classés et préparés pour cette étape d'étude statistique, dans le chapitre « Matériel et Méthodes ».

(A) La corrélation de l'âge osseux avec l'indice de masse corporelle :

L'indice de masse corporelle, dit indice de corpulence, est un critère qui reflète la croissance staturo-pondérale, puisqu'il est calculé par la combinaison de la taille et du poids.
Pour se préparer à l'étape de vérification de l'éventuelle relation qui peut exister entre l'AO et le l'IMC, cette dernière mesure, l'IMC de chaque enfant et adolescent, a été déjà calculée et classée sur la base de sa valeur par rapport à l'âge et au sexe, selon les trois catégories de masse corporelle, « Maigre », « Normal » et « Obèse ».
Les calculs qui seront effectués sur le SPSS vont faire référence, en plus de l'AO, aux valeurs et aux classes des IMC.

1. Le calcul de la moyenne de l'IMC par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 97), calcule la moyenne de l'IMC de l'échantillon, par sexe, avec les ET correspondants.
En ci-dessous (Fig. 186), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'IMC par sexe.

Tableau 97 : La moyenne des IMC, par sexe

indice de masse corporelle			
sexe du sujet	Moyenne	N	Ecart type
Féminin	17,907	70	2,4778
Masculin	18,331	68	2,8348
Total	18,116	138	2,6584

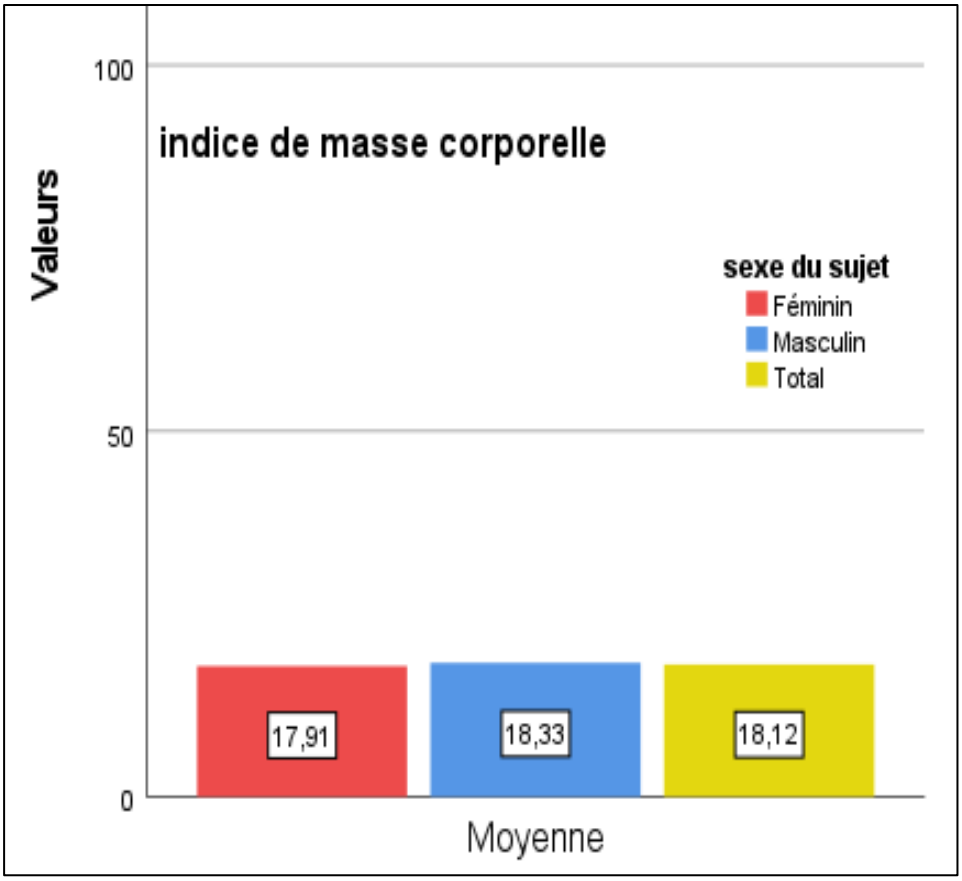


Figure 186 : La moyenne des IMC, par sexe
(Représentation graphique en barres)

2. Les statistiques des IMC :

Le tableau ci-après (Tab. 98), calcule la médiane de l'IMC ses deux valeurs, minimale et maximale, dans l'échantillon, ainsi que les deux coefficients d'asymétrie et de Kurtosis qui témoignent de la normalité de la distribution des valeurs de l'IMC de l'échantillon.

Et en ci-dessous (Fig. 187), la représentation graphique en boîte à moustaches présentant la médiane de l'IMC de la population et ses valeurs, minimale et maximale. Un aspect qui apparait symétrique et témoigne d'une valeur proche entre médiane et moyenne, et aussi de la normalité de la distribution

Tableau 98 : Les statistiques des IMC, globales et par sexes

		Statistiques
indice de masse corporelle	Moyenne	18,116
	Médiane	18,100
	Ecart type	2,6584
	Minimum	13,0
	Maximum	27,1
	Asymétrie	,597
	Kurtosis	,593

	sexe du sujet		Statistiques
indice de masse corporelle	Filles	Moyenne	17,907
		Médiane	17,900
		Ecart type	2,4778
		Minimum	13,0
		Maximum	25,0
		Asymétrie	,508
		Kurtosis	,653
	Garçons	Moyenne	18,331
		Médiane	18,150
		Ecart type	2,8348
		Minimum	13,1
		Maximum	27,1
		Asymétrie	,617
		Kurtosis	,481

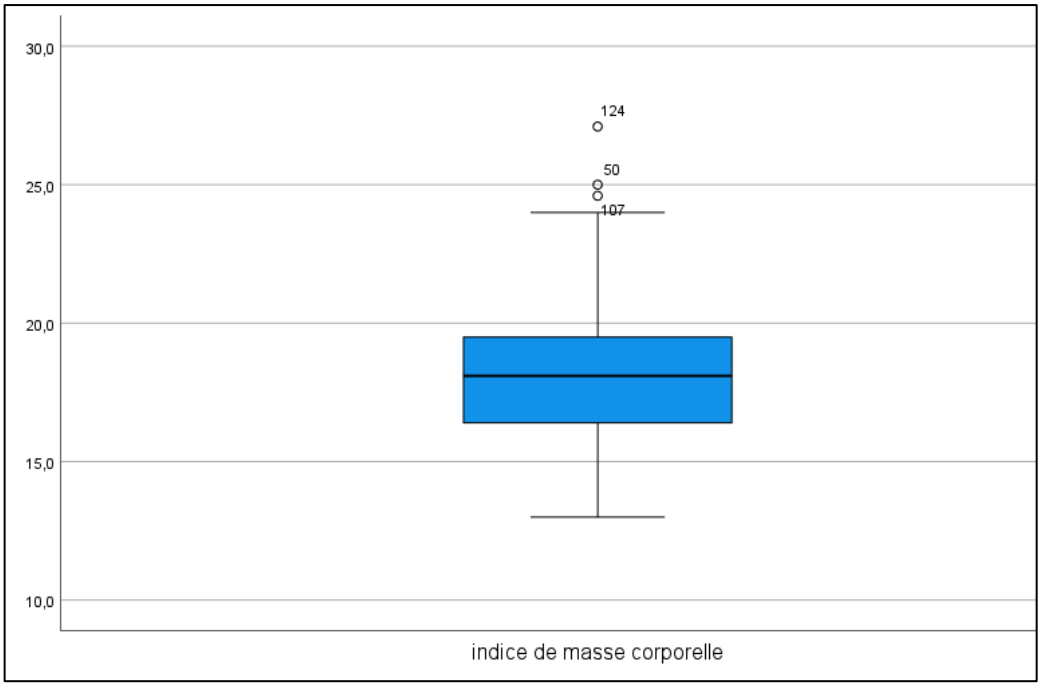


Figure 187 : La médiane des IMC
(Représentation graphique en boîte à moustaches)

3. La répartition de la population par rapport aux catégories de l'IMC, par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 99), renseigne sur l'effectif par sexe des trois catégories de l'IMC.

En ci-dessous (Fig. 188), la représentation graphique en circulaire, de pourcentages de l'effectif des trois catégories.

Et plus en dessous (Fig. 189), la représentation graphique en barres de la répartition des catégories d'IMC par sexe.

Notant que la plupart des enfants et des adolescents sont des sujets Normaux (105), avec peu d'Obèses (26) et un très peu nombre de Maigres (7).

Tableau 99 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC, par sexe

		catégories IMC			
		Maigre	Normal	Obèse	Total
sexe du sujet	Féminin	5	52	13	70
	Masculin	2	53	13	68
Total		7	105	26	138

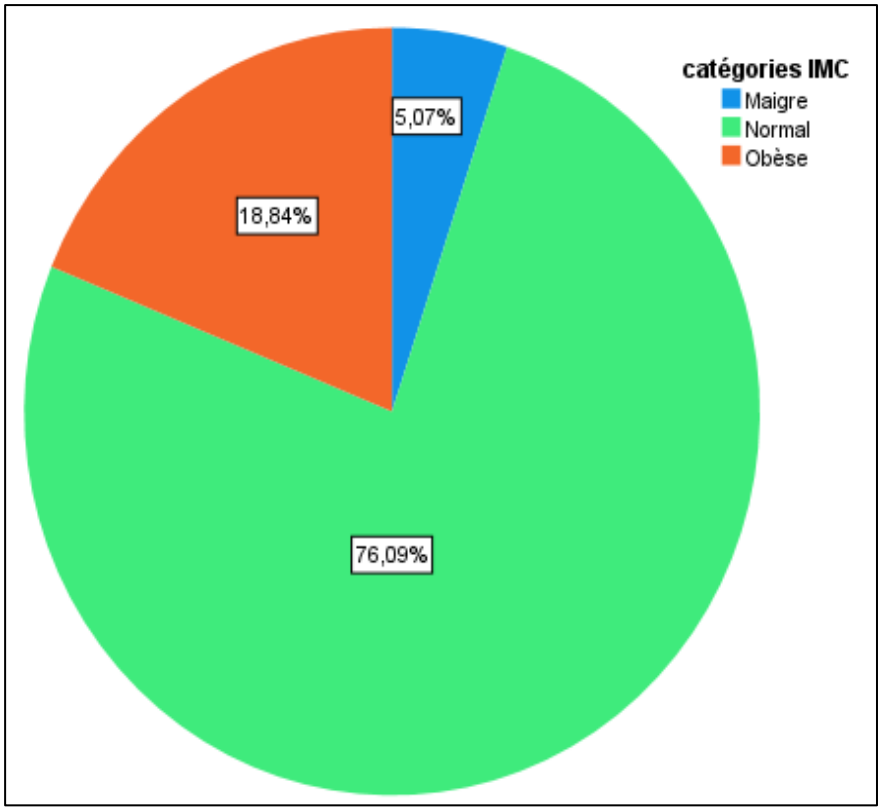


Figure 188 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC (Représentation graphique en circulaire)

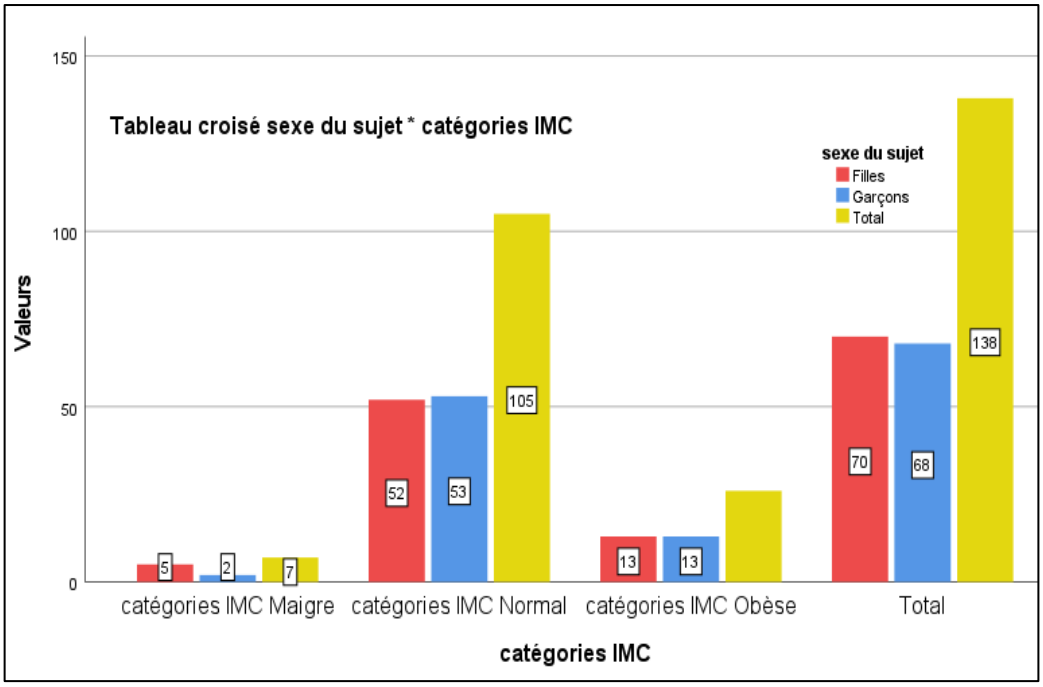


Figure 189 : La répartition de l'échantillon par catégories de l'IMC, par sexe (Représentation graphique en barres)

4. Le calcul de la moyenne de l'IMC par catégorie IMC :

Le tableau ci-après (Tab. 100), calcule la moyenne d'IMC de l'échantillon, par catégories d'IMC, avec les ET correspondants.

En ci-dessous (Fig. 190), la représentation graphique en barres de ces moyennes d'IMC par catégories d'IMC.

On note, que chaque fois qu'on se déplace d'une catégorie de masse graisseuse basse à une autre plus élevée, la valeur de la moyenne augmente en parallèle.

Tableau 100 : La moyenne de l'IMC par catégorie de l'IMC

indice de masse corporelle

catégories IMC	Moyenne	N	Ecart type
Maigre	13,900	7	,8926
Normal	17,710	105	2,1617
Obèse	20,892	26	2,3264
Total	18,116	138	2,6584

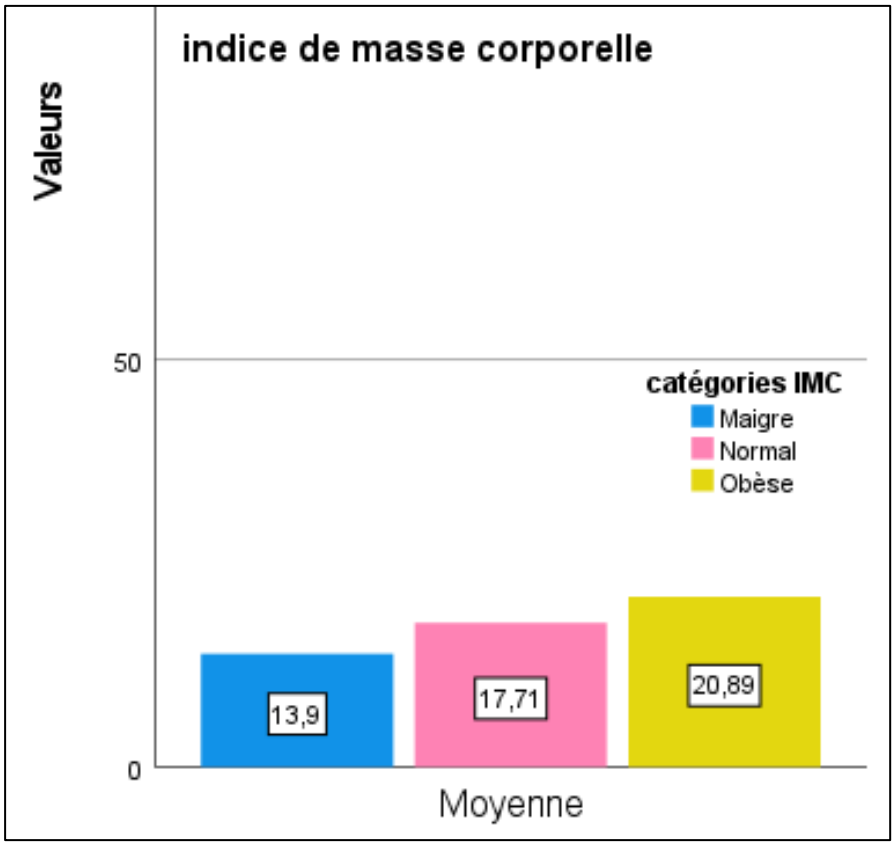


Figure 190 : La moyenne de l'IMC par catégorie de l'IMC
(Représentation graphique en barres)

5. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC par catégorie IMC :

Le tableau ci-après (Tab. 101), fait croiser la moyenne AO-AC avec les catégories de l'IMC. Il montre que chaque fois que l'IMC augmente, avec une tendance vers le surpoids, la différence AO-AC « s'améliore » [de (-) 8,71 puis (-) 0,4 et enfin (+) 4,85], c'est-à-dire que la vitesse de la maturation augmente plus qu'on passe d'un sujet Maigre à un sujet Normal, ou d'un sujet Normal à un sujet en surpoids, comme est illustré sur les deux graphes.

En ci-dessous, deux représentations graphiques :

- En courbe (Fig. 191), celle de la correspondance AO-AC et les catégories IMC ;
- En courbe aussi (Fig. 192), celle de la correspondance AO-AC et les catégories IMC, pour les deux sexes.

Tableau 101 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC

différence AOAC en mois

catégories IMC	Moyenne	N	Ecart type
Maigre	-8,71	7	6,993
Normal	-,40	105	6,595
Obèse	4,85	26	8,327
Total	,17	138	7,499

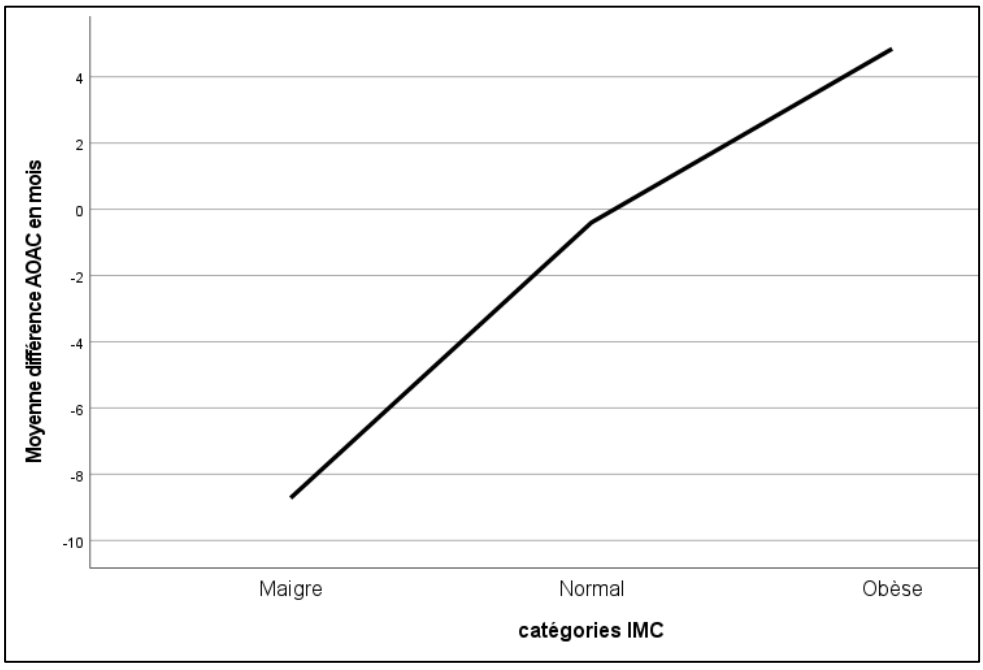


Figure 191 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC (Représentation graphique en courbe)

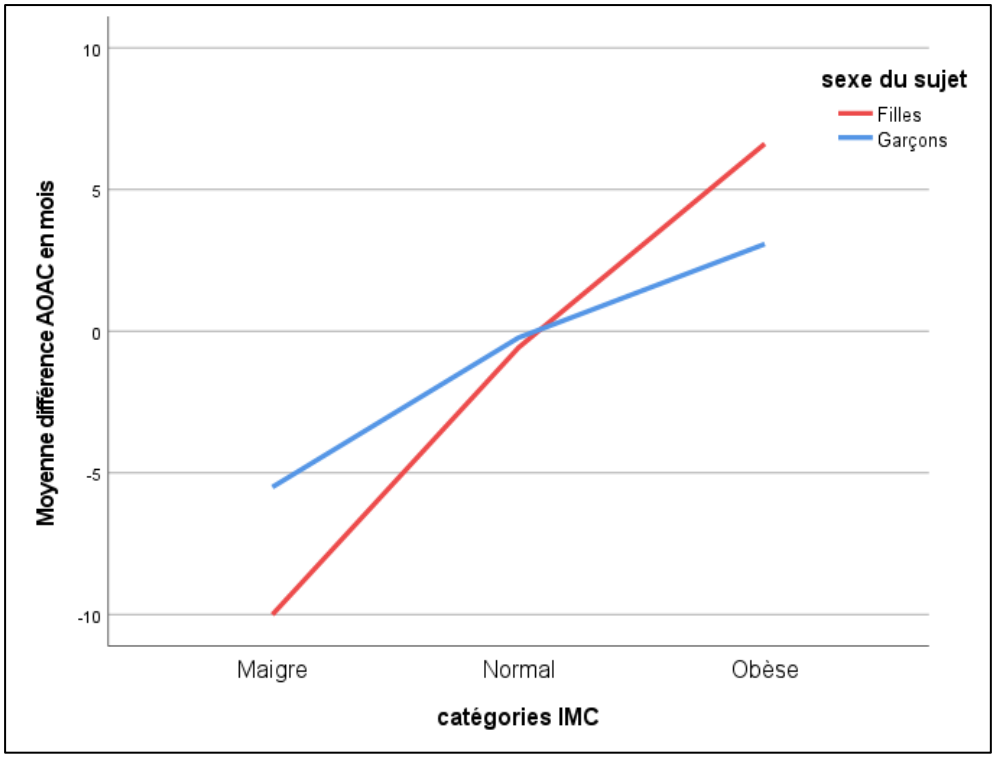


Figure 192 : La moyenne de la différence AO-AC par catégorie de l'IMC, par sexe (Représentation graphique en courbe)

6. Le calcul de la corrélation entre la moyenne AO-AC et les catégories IMC :

La corrélation entre la moyenne de la différence AO-AC et les trois catégories de l'IMC des enfants et des adolescents de l'échantillon est calculée en appliquant la corrélation de Pearson.

Le tableau ci-après (Tab. 102), calcule le coefficient de corrélation (Corrélation de Pearson) entre les deux variables, différence AO-AC et catégories IMC, avec le p value (Sig.).

On constate une bonne corrélation positive entre la différence AO-AC et les catégories IMC de l'échantillon :

- La corrélation de Pearson, qui est le coefficient de corrélation (r) est égale à 0,38 relativement pas loin de 1 ;
- Cette bonne corrélation est testée en plus par la p value qui doit être (par défaut) inférieure à 5 % (0,05) ; ici p est < 0,001 marquant la significativité de cette corrélation.

Tableau 102 : La corrélation entre la moyenne AO-AC et les catégories de l'IMC

Les 2 étoiles (**) signifient que la corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral), c.-à-d. que dans 99 % des cas ce résultat ne soit pas dû au hasard.

		différence AOAC en mois	catégories IMC
différence AOAC en mois	Corrélation de Pearson	1	,380**
	Sig. (bilatérale)		<,001
	N	138	138
catégories IMC	Corrélation de Pearson	,380**	1
	Sig. (bilatérale)	<,001	
	N	138	138

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Par ailleurs, et pour plus de confirmation, on procède à un autre test, dit d'ANOVA qui permet de vérifier cette corrélation.

Le test ANOVA est une méthode d'analyse statistique bivariée, qui consiste à croiser deux variables de nature différente, l'une quantitative, la moyenne de la différence AO-AC, et l'autre qualitative, les catégories de l'IMC. Son but est de rechercher la relation de dépendance ou d'indépendance entre ces deux variables.

Le tableau ci-après (Tab. 103), calcule le test d'ANOVA entre les deux variables : différence AO-AC et catégories IMC. Il mentionne la décision F (= 11,904), et le niveau de signification Sig. (< 0,001). Ce dernier est la valeur p qui doit être < 0,05 pour prouver qu'il existe une relation significative de dépendance entre ces deux variables, AO-AC et IMC.

Tableau 103 : Le test ANOVA entre différence AO-AC et catégories IMC

ANOVA

différence AOAC en mois

	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.
Entre groupes	1155,153	2	577,577	11,904	<,001
Intra-groupes	6550,013	135	48,519		
Total	7705,167	137			

(B) La corrélation de l'âge osseux avec le statut socio-économique :

Le SSE, est un critère consistant qui influence la croissance des enfants et des adolescents et peut avoir une « influence », à confirmer, relative ou importante sur leur maturation squelettique.

Pour se préparer à l'étape de vérification de l'éventuelle relation qui peut exister entre l'AO et le SSE, ce dernier qui est le SSE de chaque enfant et adolescent a été déjà évalué sur la base du questionnaire de cette étude, et classé selon les trois groupes socio-économiques (GSE), « Favorisé », « Moyennement favorisé » et « Défavorisé ».

Les calculs qui seront effectués sur le SPSS vont faire référence, en plus de l'AO, aux classes du SSE.

1. La répartition de la population par rapport aux GSE, par sexe :

Le tableau ci-après (Tab. 104), montre la distribution de l'effectif par rapport aux trois groupes SSE et par rapport au sexe.

En ci-dessous (Fig. 193), la représentation graphique en circulaire, des pourcentages des GSE.

Et plus en dessous (Fig. 194), la représentation graphique en barres, montrant la répartition des groupes SE par sexe.

Marquant, l'absence des sujets dans le troisième groupe SSE, le « défavorisé ».

Tableau 104 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe

		sexe du sujet		
		Filles	Garçons	Total
groupe socio-économique	favorisé	63	62	125
	moyennement favorisé	7	6	13
Total		70	68	138

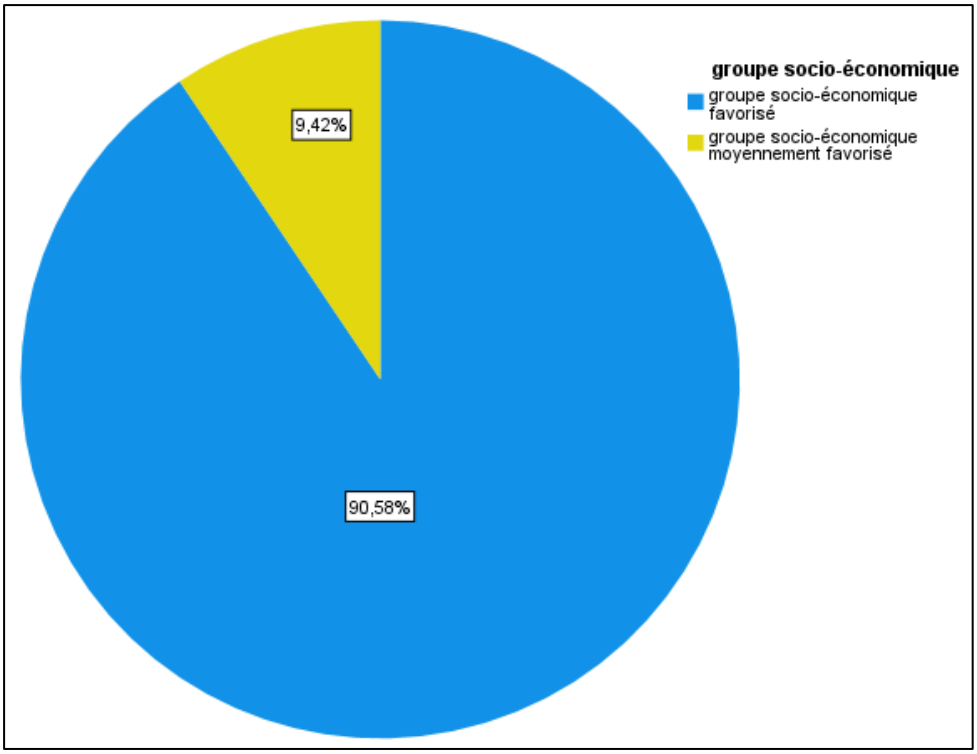


Figure 193 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe
(Représentation graphique en circulaire)

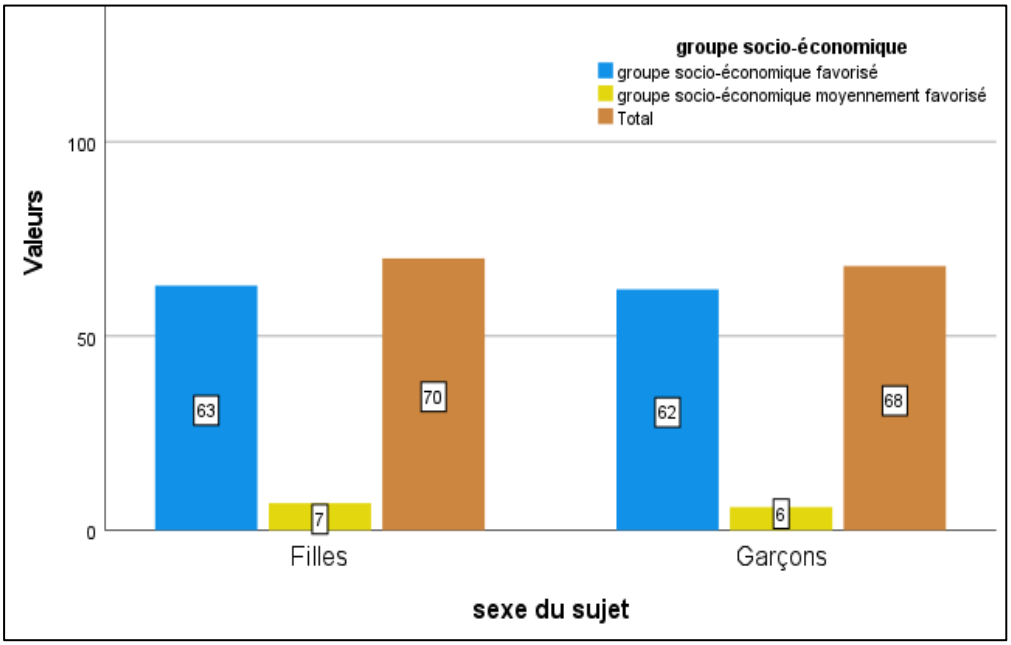


Figure 194 : La répartition de l'échantillon, par GSE et sexe
(Représentation graphique en barres)

2. Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC par GSE :

Le tableau ci-après (Tab. 105), présente la correspondance de la moyenne AO-AC avec les groupes SE. Il montre que chaque fois que le SSE s' « abaisse » [du « F » vers le « mF »], la moyenne de la différence AO-AC se « négative » [de (+) 0,66 vers (-) 4,54], c'est-à-dire que la maturation squelettique diminue de vitesse est donc l'AO recule par rapport à l'AC.

En ci-dessous, deux représentations graphiques qui illustrent cette constatation :

- En courbe (Fig. 195), celle de la correspondance AO-AC et les groupes SE ;
- En courbe aussi (Fig. 196), celle de la correspondance AO-AC et les groupes SE, pour les deux sexes.

Tableau 105 : La moyenne de la différence AO-AC, par GSE

différence AOAC en mois			
groupe socio-économique	Moyenne	N	Ecart type
favorisé	,66	125	7,269
moyennement favorisé	-4,54	13	8,343
Total	,17	138	7,499

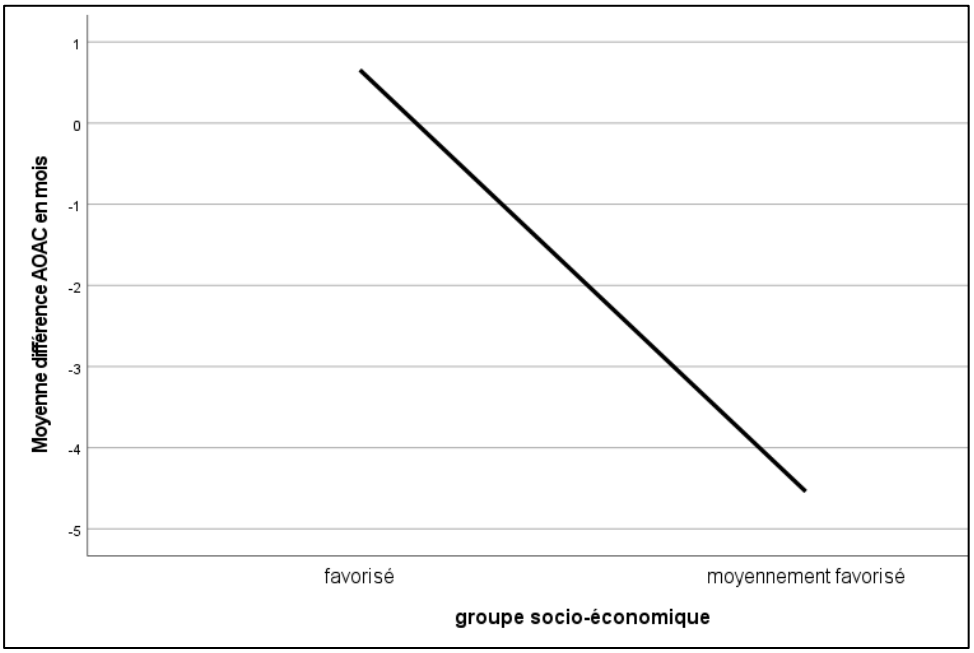


Figure 195 : La correspondance AO-AC et les groupes SE
(Représentation graphique en courbe)

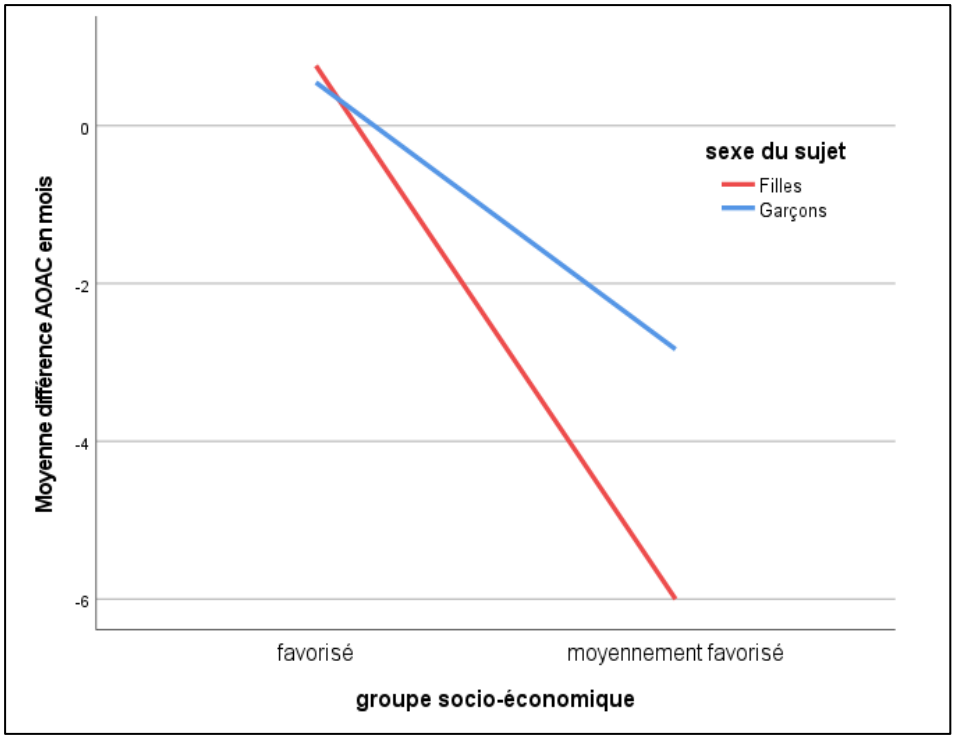


Figure 196 : La correspondance AO-AC et les groupes SE, par sexe (Représentation graphique en courbe)

3. Le calcul de la corrélation entre la moyenne AO-AC et les groupes SSE :

La corrélation entre la moyenne de la différence AO-AC et les GSE des enfants et des adolescents de l'échantillon est calculée en appliquant la corrélation de Pearson.

Le tableau ci-après (Tab. 106), calcule le coefficient de corrélation (Corrélation de Pearson) entre les deux variables, différence AO-AC et groupes SSE, avec le p value (Sig.).

On constate une relative corrélation négative entre la différence AO-AC et les GSE de l'échantillon :

- La corrélation de Pearson, qui est le coefficient de corrélation (r) est égale à (-) 0,203 donc relativement loin de (-) 1 ;
- Cette relative corrélation est testée en plus par la valeur p qui doit être (par défaut) inférieure à 5 % (0,05) ; ici p = 0,017 marquant la significativité de cette corrélation.

Tableau 106 : La corrélation de Pearson entre la moyenne AO-AC et les GSE

		différence AOAC en mois	groupe socio-économique
différence AOAC en mois	Corrélation de Pearson	1	-,203*
	Sig. (bilatérale)		,017
	N	138	138
groupe socio-économique	Corrélation de Pearson	-,203*	1
	Sig. (bilatérale)	,017	
	N	138	138

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

Afin de confirmer cette corrélation, nous allons la vérifier par le test ANOVA, en croisant les deux variables précédentes, la moyenne de la différence AO-AC et les groupes SSE.

Le tableau ci-après (Tab. 107), calcule le test d'ANOVA entre les deux variables différence AO-AC et GSE. Il donne la valeur F (= 5,849), et le niveau de signification Sig. (0,017). Ce dernier est la valeur p qui doit être < 0,05. Ce qui est interprété par l'existence d'une relation de dépendance significative entre ces deux variables, avec un impact du SSE sur l'AO.

Tableau 107 : Le test ANOVA entre la différence AO-AC et les GSE

ANOVA

différence AOAC en mois

	Somme des carrés	df	Carré moyen	F	Sig.
Entre groupes	317,728	1	317,728	5,849	,017
Intra-groupes	7387,439	136	54,319		
Total	7705,167	137			

(C) La relation entre l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique :

Le tableau croisé ci-après (Tab. 108), présente la répartition de l'effectif par rapport aux catégories IMC et aux groupes SE.

Et en ci-dessous (Fig. 197), la représentation graphique en barres, de la répartition de l'échantillon, par catégories IMC et groupes SSE.

Et plus en dessous (Fig. 198), la représentation graphique en courbe, de la répartition de l'échantillon, par catégories IMC et groupes SSE.

On remarque qu'il n'y a pas de sujets maigres et à statut « F », et quand on passe vers le statut « mF » le nombre de sujets normaux ou en surpoids diminue, et celui des maigres augmente.

Tableau 108 : La répartition de l'effectif entre l'IMC et le SSE

		catégories IMC			
		Maigre	Normal	Obèse	Total
groupe socio-économique	favorisé	0	101	24	125
	moyennement favorisé	7	4	2	13
Total		7	105	26	138

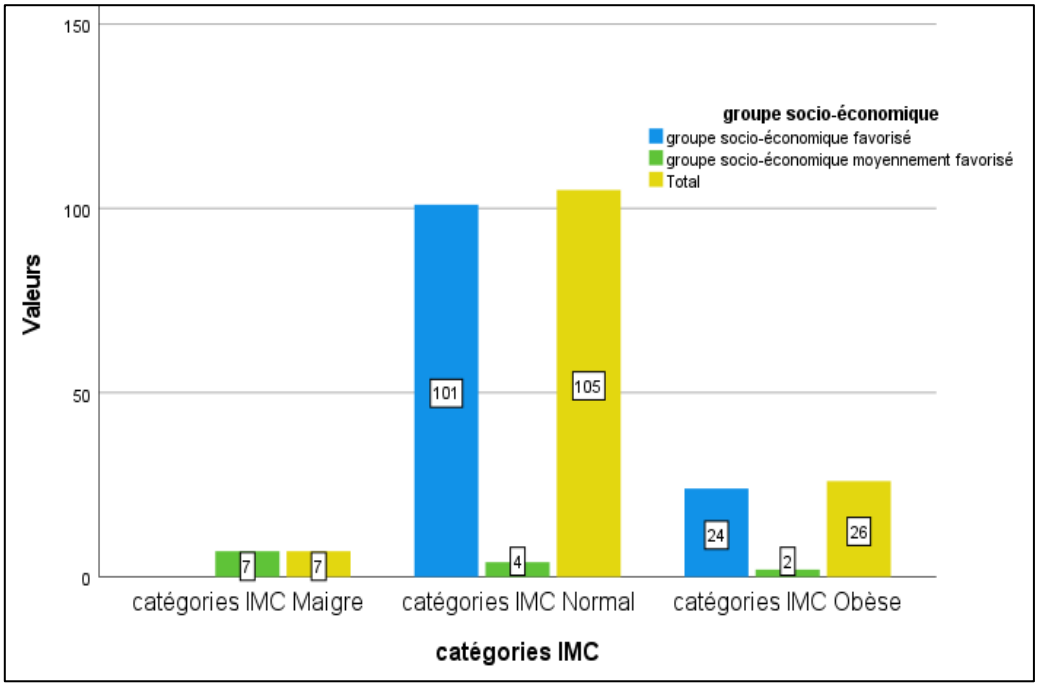


Figure 197 : La répartition de l'échantillon, par catégories IMC et groupes SSE (Représentation graphique en barres)

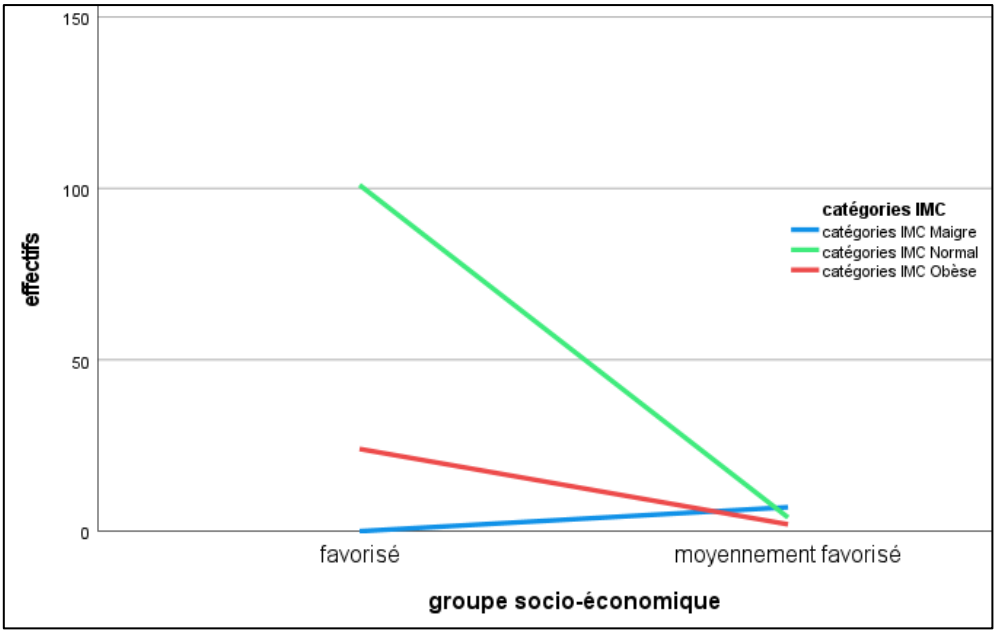


Figure 198 : La correspondance des catégories IMC aux groupes SE, par effectifs (Représentation graphique en courbes)

La corrélation entre deux variables qualitatives, les groupes SE et les catégories IMC, sera calculée par le test de Spearman.

Le tableau ci-après (Tab. 109), calcule le coefficient de corrélation (Corrélation de Spearman) entre les deux variables groupes SSE et catégories IMC, avec le p value (Sig.). Il trouve un r = (-) 0,322 qui va confirmer une corrélation relative et négative, et significative puisque p < 0,001.

Tableau 109 : La corrélation de Spearman entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE

			groupe socio-économique	catégories IMC
Rho de Spearman	groupe socio-économique	Coefficient de corrélation	1,000	-,322**
		Sig. (bilatérale)	.	<,001
		N	138	138
	catégories IMC	Coefficient de corrélation	-,322**	1,000
		Sig. (bilatérale)	<,001	.
		N	138	138

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Pour plus de confirmation, la relation entre les groupes SEE et les catégories IMC sera identifié par le Khi deux, ce test vérifie la relation d'indépendance ou d'influence entre deux variables qualitatives nominales, comme pour notre cas.

Le tableau ci-après (Tab. 110), expose les résultats du test Khi-2, et le niveau de signification (bilatérale) qui est < 0,001 prouve qu'il y a une relation significative entre IMC et SSE.

Tableau 110 : Le test Khi-deux entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE

Tests du khi-carré			
	Valeur	df	Signification asymptotique (bilatérale)
Khi-deux de Pearson	71,272[a]	2	<,001
Rapport de vraisemblance	38,066	2	<,001
Association linéaire par linéaire	17,653	1	<,001
N d'observations valides	138		

Pour avoir une idée sur la force de cette relation, on calcul l'indice de Cramer, qui varie entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, plus la relation est forte
Le tableau ci-après (Tab. 111), vérifie la force de la relation IMC et SSE, le V de Cramer = 0,719 donc proche de 1, et cette force est significative (p < 0,001).

Tableau 111 : L'indice de Cramer entre les catégories d'IMC et les groupes de SSE

		Valeur	Signification approximative
Nominal par Nominal	Phi	,719	<,001
	V de Cramer	,719	<,001
N d'observations valides		138	

Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique

Cet Atlas…

L' « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » est une collection radiographique préliminaire, sélectionnée à partir des clichés radiographiques de l'étude, il expose de manière successive, l'évolution de la maturation squelettique chez des enfants et des adolescents algériens.

Ce travail repose sur des « modalités de sélection » des enfants et des adolescents pour déterminer les individus « standards » comme référence d'âge osseux. Cette sélection sera basée sur l'aspect « médian » de la radiographie par rapport à l'ensemble des radiographies de la même tranche d'âge, et sur la qualité de la radiographie... Les clichés radiographiques « standards » retenus seront à la base de cet « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique ».

L'« Atlas », ainsi édité, assiste aux évènements d'apparition des noyaux des os longs du carpe, des os courts du carpe, des métacarpiens, des phalanges et des sésamoïdes, et aussi de leurs modifications morphologiques voire des fusions épiphyso-diaphysaires.

Cet « Atlas » est remarquable par :

- Sa couverture de la plupart des trente-quatre tranches d'âge, sériées par semestre, par des clichés radiographiques numériques pour la majorité ;
- Des reproductions radiographiques doubles, sous forme de séquences masculines et de séquences féminines, respectant ainsi les particularités des deux sexes et s'alignant avec la notion de décalage Filles/Garçons ;
- Le choix de l'âge osseux sur lequel les reproductions sont choisies, et non l'âge civil qui est présumé connu.

A la fin, on note quelquefois des « reculs » des images sur deux séquences successives, ce qui témoigne de la variabilité individuelle, naturellement existante entre les enfants et les adolescents du même âge civil, et qui caractérise l'évolution de la maturation squelettique. Dans tous les cas, ce sont ces « reculs » qui peuvent expliquer les quelques critiques qui visent les méthodes transversales.

Anatomie du poignet et de la main : les légendes

La main en position de lecture de l'âge osseux : les doigts dirigés vers le haut, à l'inverse de la position anatomique, ce qui permet un meilleur centrage sur la tête du métacarpien III.

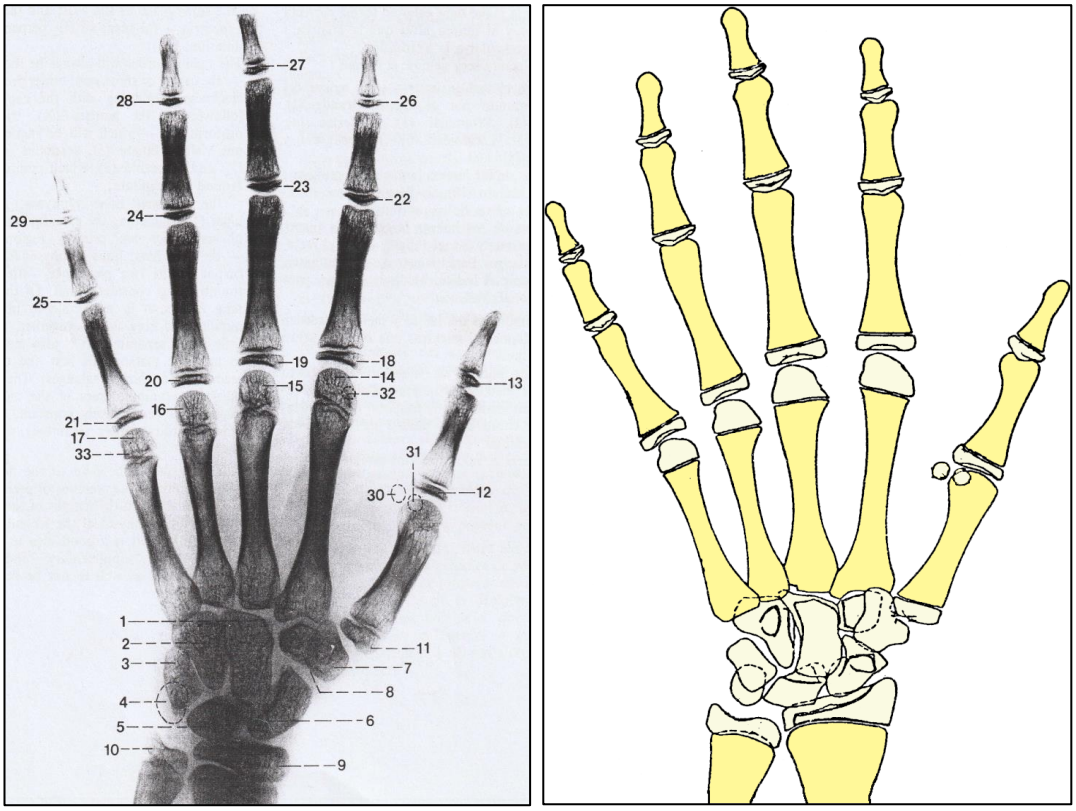


Figure 199 : Le squelette de la main et du poignet montrant les 33 indicateurs osseux de maturation, sur un cliché radiographique et sur un schéma correspondant [139]

1. Capitatum
2. Hamatum
3. Triquétrum
4. Pisiforme
5. Lunatum
6. Scaphoïde
7. Trapèze
8. Trapézoïde
9. Radius
10. Ulna
11. Epiphyse proximale du métacarpien I
12. Epiphyse proximale de la 1ère phalange du pouce
13. Epiphyse proximale de la 2ème phalange du pouce

14. Epiphyse distale du métacarpien II
15. Epiphyse distale du métacarpien III
16. Epiphyse distale du métacarpien IV
17. Epiphyse distale du métacarpien V
18. Epiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt II
19. Epiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt III
20. Epiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt IV
21. Epiphyse proximale de la 1ère phalange du doigt V
22. Epiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt II
23. Epiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt III
24. Epiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt IV
25. Epiphyse proximale de la 2ème phalange du doigt V
26. Epiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt II
27. Epiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt III
28. Epiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt IV
29. Epiphyse proximale de la 3ème phalange du doigt V
30. Sésamoïde 1 du pouce
31. Sésamoïde 2 du pouce
32. Sésamoïde de l'index
33. Sésamoïde du doigt V

Hors séquences :

Toute la légende précédente est inexistante sur la radiographie d'un nouveau-né.



Figure 200 : Cliché de O. Mohamed. Age osseux = 0 mois

LES SÉQUENCES MASCULINES

1. L. Abdelmoumen, **6 mois**
2. B. Raed, **11 mois**
3. S. Barae, **1 an et 1 mois**
4. D. Mohamed Chahid, **1 an et 11 mois**
5. B. Ibrahim Anes, **2 ans et 1 mois**
6. A. Moatez, **2 ans et 11 mois**
7. D. Raed Salah, **3 ans et 3 mois**
8. B. Selmane, **3 ans et 7 mois**
9. A. Amine Arrehmane, **4 ans et 2 mois**
10. G. Anes, **4 ans et 9 mois**
11. C. Khalil, **5 ans et 6 mois**
12. B. Ayoud, **5 ans et 10 mois**
13. R. Khaled, **6 ans et 6 mois**
14. S. Mosaab, **6 ans et 7 mois**
15. B. Islam, **7 ans et 1 mois**
16. H. Mohamed, **7 ans et 8 mois**
17. B. Akram, **8 ans et 3 mois**
18. R. Islam, **8 ans et 9 mois**
19. B. Alaeddine, **9 ans et 5 mois**
20. B. Abdelali, **9 ans et 8 mois**
21. A. Khireddine, **10 ans et 0 mois**
22. B. Raed, **10 ans et 11 mois**
23. M. Nouaim, **11 ans et 0 mois**
24. S. Mohamed Zine, **11 ans et 11 mois**
25. T. Anis, **12 ans et 1 mois**
26. A. Taha, **12 ans et 11 mois**
27. L. Amine, **13 ans et 2 mois**
28. B. Ibrahim, **13 ans et 7 mois**
29. G. Anes, **14 ans et 5 mois**
30. B. Anes, **14 ans et 11 mois**
31. K. abdelmoumen, **15 ans et 1 mois**
32. B. Islem, **16 ans et 1 mois**

Age osseux = 6 mois



Age osseux = 11 mois



Age osseux = 1 an, 1 mois



Age osseux = 1 an, 11 mois



Age osseux = 2 ans, 1 mois



Age osseux = 2 ans, 11 mois



Age osseux = 3 ans, 3 mois



Age osseux = 3 ans, 7 mois



Age osseux = 4 ans, 2 mois



Age osseux = 4 ans, 9 mois



Age osseux = 5 ans, 6 mois



Age osseux = 5 ans, 10 mois



Age osseux = 6 ans, 6 mois



Age osseux = 6 ans, 7 mois



Age osseux = 7 ans, 1 mois



Age osseux = 7 ans, 8 mois



Age osseux = 8 ans, 3 mois



Age osseux = 8 ans, 9 mois



Age osseux = 9 ans, 5 mois



Age osseux = 9 ans, 8 mois



Age osseux = 10 ans, 0 mois



Age osseux = 10 ans, 11 mois



Age osseux = 11 ans, 0 mois



Age osseux = 11 ans, 11 mois





Age osseux = 12 ans, 1 mois





Age osseux = 12 ans, 11 mois



Age osseux = 13 ans, 2 mois



Age osseux = 13 ans, 7 mois



Age osseux = 14 ans, 5 mois



Age osseux = 14 ans, 11 mois



Age osseux = 15 ans, 1 mois



Age osseux = 16 ans, 1 mois



LES SÉQUENCES FÉMININES

1. D. Razane, **5 mois**
2. R. Djoumana, **9 mois**
3. B. Alae, **1 an et 0 mois**
4. K. Nour el-imane, **1 an et 8 mois**
5. G. Aroua, **2 ans et 6 mois**
6. B. Insaf, **2 ans et 7 mois**
7. D. Halima, **3 ans et 6 mois**
8. S. Hiba, **3 ans et 9 mois**
9. K. Malek, **4 ans et 6 mois**
10. F. Nesrine, **4 ans et 7 mois**
11. S. Tesnime, **5 ans et 1 mois**
12. R. Djihène, **5 ans et 8 mois**
13. M. Soumaia, **6 ans et 6 mois**
14. D. Tasbih Alabrar, **6 ans et 8 mois**
15. M. Salsabil, **7 ans et 0 mois**
16. Z. Ghania, **7 ans et 7 mois**
17. O. Malak, **8 ans et 1 mois**
18. K. Imene, **8 ans et 11 mois**
19. B. Raihane, **9 ans et 1 mois**
20. B. Nour, **9 ans et 10 mois**
21. B. Ghofrane, **10 ans et 2 mois**
22. B. Abir, **10 ans et 9 mois**
23. K. Amina, **11 ans et 1 mois**
24. A. Rafif, **11 ans et 11 mois**
25. K. Rokaya, **12 ans et 0 mois**
26. G. Aroua, **12 ans et 7 mois**
27. R. Zineb, **13 ans et 2 mois**
28. K. Sirine, **14 ans et 4 mois**
29. H. Yzsmine, **14 ans et 8 mois**
30. A. Ranim, **15 ans et 3 mois**
31. F. Alae, **15 ans et 7 mois**

Age osseux = 5 mois

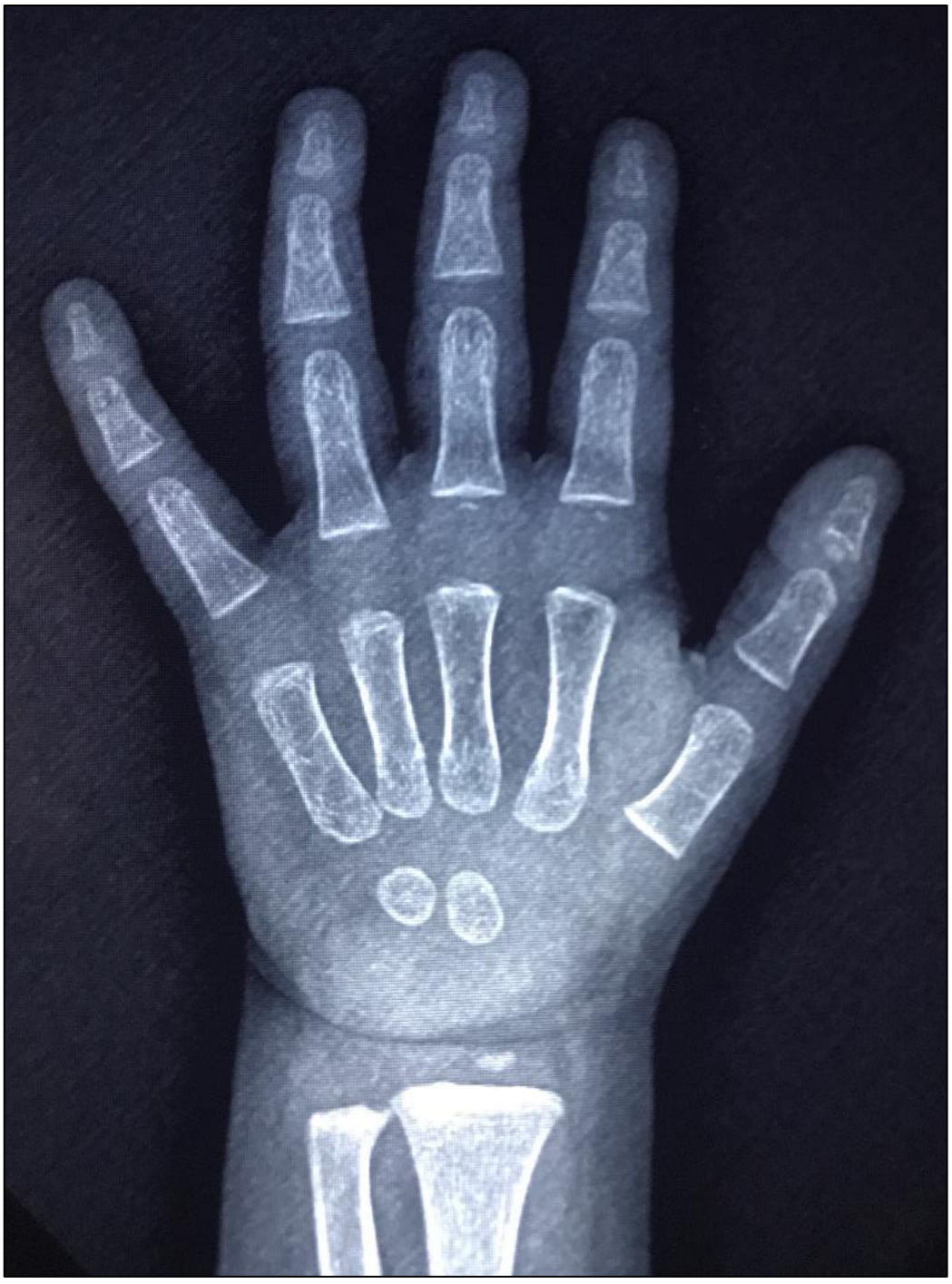


Age osseux = 9 mois





Age osseux = 1 an, 0 mois



Age osseux = 1 an, 8 mois



Age osseux = 2 ans, 6 mois



Age osseux = 2 ans, 7 mois



Age osseux = 3 ans, 6 mois



Age osseux = 3 ans, 9 mois



Age osseux = 4 ans, 6 mois



Age osseux = 4 ans, 7 mois



Age osseux = 5 ans, 1 mois



Age osseux = 5 ans, 8 mois



Age osseux = 6 ans, 6 mois



Age osseux = 6 ans, 8 mois



Age osseux = 7 ans, 0 mois



Age osseux = 7 ans, 7 mois



Age osseux = 8 ans, 1 mois



Age osseux = 8 ans, 11 mois



Age osseux = 9 ans, 1 mois



Age osseux = 9 ans, 10 mois



Age osseux = 10 ans, 2 mois



Age osseux = 10 ans, 9 mois



Age osseux = 11 ans, 1 mois



Age osseux = 11 ans, 11 mois



Age osseux = 12 ans, 0 mois



Age osseux = 12 ans, 7 mois



Age osseux = 13 ans, 2 mois



Age osseux = 14 ans, 4 mois



Age osseux = 14 ans, 8 mois



Age osseux = 15 ans, 3 mois



Age osseux = 15 ans, 7 mois



DISCUSSION

III - DISCUSSION

La radiographie du poignet et de la main gauches est l'outil, la procédure et le langage qui expriment l'état de maturation osseuse des enfants et des adolescents.
La radiographie est un outil qui a « bourgeonné » avec Röntgen en 1895, sous forme d'un cliché de la main, et depuis, la radiographie de la main s'est développée, prenant de l'ampleur dans le domaine de la recherche scientifique et en pratique médicale quotidienne.
La radiographie d'une région anatomique, ici le poignet et la main, est aussi une procédure en elle-même, qui se base sur des « gestes » menés d'une manière spontanée par Röntgen, pour radiographier la main de son épouse, il y a plus d'un siècle, avec une incidence de face et des doigts écartés. Aujourd'hui, quand on procède à faire un cliché de la main pour âge osseux, on reproduit exactement les mêmes « gestes », étudiés cette fois-ci.
La radiographie du poignet et de la main gauches est enfin, un langage de la personne radiographiée, un langage qui n'a pas de « son » mais il a un « sens » ; pour Sempé, ce langage est « infra-verbal dans son expression, [mais] supra-verbal dans son interprétation » [137] : le sujet parle de son degré de maturation osseuse par l'intermédiaire de son imagerie squelettique. Ce langage est biologique, celui que l'enfant et l'adolescent nous adresse au jour le jour, grâce à leurs changements, et par l'entremise d'images radiologiques changeantes [137, 139].
Le langage biologique contenu dans un seul cliché radiographique est riche et explicite, et les informations fourni par la détermination de la maturation osseuse sont multiples et dépassent largement le simple chiffrage d'un âge osseux. En effet, la formule mnémotechnique « 2P, 2O, 2C » permet de bien retenir les éléments, autrement dit les « titres », d'analyse de notre étude :

- analyser la Population d'étude (moyennes, tranches d'âge, normalité…) ;
- estimer et étudier l'âge Osseux de tous l'échantillon (normalité, variabilité…) ;
- vérifier la Correspondance de l'âge osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon aux données de la méthode de Sempé (fiabilité de la méthode) ;
- suivre les grands évènements de l'Ossification (apparition des points d'ossification et fusion des épiphyses) ;
- prélever les indicateurs osseux qui apparaissent au moment de la Puberté (pisiforme, sésamoïde…)
- rechercher les Corrélations qui peuvent exister entre l'âge osseux et des paramètres en rapport avec la croissance (indice de masse corporelle et statut socio-économique).

Et sur ces différents éléments d'analyse que le chapitre précédent, « Résultats », a travaillé.

L’intérêt de ce présent chapitre, « Discussion », est de valider les résultats obtenus de notre série en comparant ces résultats à ceux obtenus dans d’autres séries faites avant.

Ce troisième chapitre, sera traité selon le plan suivant :

(1) La population d’étude, en général
(2) L’applicabilité de la méthode de Sempé
(3) L’évolution de la maturation squelettique
(4) Les corrélations de l’âge osseux

(1) LA POPULATION D'ETUDE, EN GENERAL

A partir de cet échantillon de taille définie, et en se basant sur l'analyse statistique faite dans le chapitre « Résultats », nous pouvons énumérer les caractéristiques de l'échantillon pour notre étude :

a. **<u>Les garçons et les filles dans l'échantillon :</u>** (Tab. 51 ; Fig. 158)
Les deux sexes sont représentés dans notre échantillons, avec une quasi-égalité de nombre, d'un côté 70 filles (soit 50,7 %) et 68 garçons (soit 49,3 %) de l'autre côté.

b. **<u>La moyenne des âges de l'échantillon :</u>** (Tab. 52 ; Fig. 159)
Cette moyenne est de 77,05 mois ± 55,105 (6 ans, 5 mois ± 4 ans, 7 mois), avec une prédominance des filles (80,60 mois ± 54,109) par rapport aux garçons (73,40 mois ± 56,277).

c. **<u>Le bas âge et le plus âgé dans l'échantillon :</u>** (Tab. 53 ; Fig. 160)
3 mois est l'âge le plus bas dans l'échantillon qui est celui d'un garçon (l'âge le plus bas chez les filles est 5 mois), et le sujet le plus ainé, est une fille qui est âgé de 203 mois, soit 16 ans et 11 mois (l'âge le plus bas chez les garçons est 196 mois soit 16 ans et 4 mois).
Notant la médiane de l'échantillon qui est 67,50 mois, soit 5 ans et 7 mois, qui ne diffère pas trop de la moyenne (77,05 mois), ce qui preuve une normalité respectée de l'échantillon.

d. **<u>Les tranches d'âge de l'échantillon :</u>** (Tab. 54 ; Fig. 161)
Pour plus de précision de l'étude, plus de rentabilité dans les résultats et plus de pertinence dans les déductions, la population a été morcelée en 17 tranches d'âge, de 12 mois d'étendue, pour chaque sexe.

- **Le nombre de sujets par tranche d'âge :**
  Il diffère d'une tranche à l'autre et d'un sexe à l'autre : le nombre minimal est de 2 (la tranche d'âge 13), avec un seul garçon et une seule fille ; le nombre maximal est le 17 (la tranche d'âge 2), avec 9 garçons et 8 filles.
  Ce nombre, qu'il soit petit ou grand, est admissible et utilisable pour envisager des résultats et tirer des conclusions, tout comme Léonetti et coll., pour leur étude sur les crânes concernant la variation de l'angle sphénoïdal, qui ont travaillé sur des tranches d'âge de nombre varié, de la plus nombreuse (40 sujets) à la moyenne (10 sujets) jusqu'aux tranches à bas nombre (3 sujets). De même que Koc et coll. qui, en travaillant sur la différence de maturation entre leur échantillon de garçons turcs par rapport aux standards de GP, avaient 4 sujets dans leur catégorie de 17 ans [67].

- **L'étendue des tranches d'âge de l'échantillon** :

  Ce qui est connu, c'est que la précision d'une méthode d'évaluation de la maturation squelettique dépendra de cette division en tranches d'âge, c'est-à-dire, plus la tranche d'âge est petite plus l'âge estimé s'approchera de l'âge chronologique [67]. Pour notre étude, nous nous sommes basé sur des petits intervalles, d'une seule année, afin de travailler avec une variable d'âge civil continue et d'avoir plus de précision dans nos résultats.

  Par ailleurs, et à l'inverse, plusieurs études de l'estimation de l'âge ont travaillé sur des tranches d'âge larges : étude de Léonetti et coll. (tranche d'âge de 5 ans d'étendue) et étude de Kobyliansky et coll. (tranche d'âge de 10 ans d'étendue), ce qui a créer une certaine relativité d'utilisation [67].

  Dans tous les cas, pour plus de précision, il faut des tranches d'âge petites et cela nécessite un échantillon nettement plus grand au départ… ce qui aurait l'avantage de travailler avec une variable continue plutôt que discrète [67].

e. **<u>La répartition communale de l'échantillon :</u>** (Tab. 55 ; Fig. 162)

La moitié des communes de la wilaya d'Annaba sont représentées dans l'échantillon, la plupart des enfants et des adolescents habitent la commune d'Annaba (n = 88), mais aussi, par ordre décroissant, les communes : Sidi Amar (n = 17), El-Bouni (n = 8), Berrahal (n = 5), El-Hadjar (n = 4), Eulma (n = 3) et Cheurfa (n = 3).

Notant un certain nombre d'enfants (n = 10) dont leur domicile n'a pas été identifié (par omission).

f. **<u>Le recrutement des enfants et des adolescents :</u>** (Tab. 56 ; Fig. 163)

Ce recrutement s'est étalé sur une période de plusieurs années, entre 2012 et 2024, avec une rupture « non programmée » au milieu de la période, de 2016 au 2022.

Le grand nombre de recrutement s'est marqué en 2014 (n = 87), avec un recrutement moins nombreux dans les années 2012 (n = 1), 2013 (n = 10), 2015 (n = 21), 2023 (n = 4) et 2024 (n = 15).

g. **<u>L'origine de la prise des clichés radiographiques :</u>** (Tab. 57 ; Fig. 164)

Les clichés radiographiques ont été pris principalement dans deux établissements hospitaliers, l'Hôpital pédiatrique « Sainte Thérèse » (n = 74) et la Clinique Alfarabi (n = 44). Le nombre des clichés qui restent (n = 20) est pris dans d'autres centres d'imagerie médicale. Il est à noter que tous les clichés pris au sein des deux établissements hospitaliers datent des années 2013-2015.

h. <u>La normalité « statistique » de l'échantillon :</u> (Tab. 58 ; Fig. 165 et 166)

La population suit globalement la loi normale de Gauss, testée par deux paramètres, celui de l'Asymétrie et celui de l'Aplatissement (Kurtosis) qui sont avérés proche, à moitié ou presque, de zéro.

Parmi les postulats statistiques, c'est qu'un échantillon aléatoire doit être choisi dans une distribution normale. Néanmoins, si la taille de l'échantillon est supérieure à n = 30, il n'est pas indispensable que la distribution soit normale [18].

i. <u>Le niveau socio-économique des familles des enfants et des adolescents :</u> (Tab. 104 ; Fig. 193 et 194)

La plupart des enfants et des adolescents (n = 125) appartient à un niveau socio-économique aisé, dit favorisé, avec une égalité entre les filles et les garçons. La minorité (n = 13) appartient à un niveau socio-économique moyen, dit moyennement favorisé.

Nous n'avons pas trouvé de couches défavorisées parmi les sujets de l'échantillon, pour cette raison l'échantillon ne présente que deux groupes socio-économiques (GSE).

(2) L'APPLICABILITE DE LA METHODE DE SEMPE

La discussion présente est consacrée à la réponse à la question de l'applicabilité de la méthode d'évaluation de la maturation squelettique de Sempé, ce qui va justifier maintenant et après le choix de cette méthode dans le suivie de la maturation osseuse chez les enfants et les adolescents algériens.

La méthode du Professeur Michel SEMPE, représentée dans cette étude pratique par son logiciel Maturos® 4.0, qui était la dernière version informatisée de sa méthode, éditée en 2001, est dédiée à l'évaluation de la maturation osseuse couplant la simplicité, la rapidité et la précision.

Parmi les objectifs de notre étude est d'avoir une estimation de la maturation squelettique, l'âge osseux (AO) par rapport à l'âge chronologique (AC), en appliquant la méthode de Sempé sur un échantillon contemporain d'enfants et d'adolescents algériens ce qui va nous permettre de vérifier l'applicabilité et la fiabilité de cette méthode pour la population algérienne.

Dans ce sens, nous devons rappeler que toute comparaison d'une mesure aux paramètres d'une population n'a de sens que si le sujet étudié peut être assimilé à la population de référence. Dans notre cas, la population de référence est celle de Sempé, dont on doit prouver son applicabilité. Certes, dans cette situation, la difficulté est de pouvoir confronter les résultats obtenus à ceux établis par une étude de référence, et en absence d'une telle comparaison, les résultats ne devraient être considérés que comme expérimentaux [67].

Le choix nous a conduit à la méthode du Professeur Sempé pour les « plusieurs » raisons déjà avancées (voir : chapitre « Matériel et Méthodes »). Tout en sachant qu'il y a sur l'autre côté des différentes méthodes basées sur la radiographie du poignet et de la main gauches (Greulich et Pyle GP, TW2, Fels, etc…), connues et conçues pour une telle estimation de maturation squelettique, mais qui ont une méthodologie statistique différente et un système de score relativement différent, ce qui rendent la comparaison non pertinente [67].

Le taux de maturation squelettique pour chaque enfant et adolescent a été calculé par le Logiciel Maturos ® 4.0 pour deux buts : déterminer l'AO des sujets d'une part, et d'autre part, vérifier si les standards définis dans le Maturos pouvaient toujours être rapportés à notre échantillon et par conséquent applicables à des enfants et adolescents contemporains et algériens.

Le logiciel Maturos ® 4.0 a été aussi choisi et utilisé parce qu'il permet une évaluation précise de la maturation squelettique tout en étant rapide […] Il nous semble d'utilisation facile grâce aux nouvelles fonctions d' « aide au diagnostic ». Cette dernière est utile et permet l'apprentissage des différents stades maturatifs en proposant des exemples. Il devrait constituer une aide appréciable, et peut être un outil incontournable en recherche clinique, en endocrinologie et en radiologie

pédiatrique mais également dans d'autres spécialités s'intéressant à la maturation squelettique de l'enfant comme l'orthopédie pédiatrique, l'orthodontie, la médecine du sport et probablement d'autres encore [23, 24].

A. La détermination de l'âge osseux par la méthode de Sempé :

Plusieurs remarques en matière de détermination de l'âge osseux sont déduites à partir des tableaux et figures des « Résultats » (voir : Tab. 59-62 ; Fig. 167-174) :

(1) L'âge osseux estimé présente une moyenne globale de 77,22 (6 ans et 5 mois), qui s'écarte, par ses ET, à plus de 54 mois (4 ans et 6 mois) dans les deux côtés, ce qui démontre l'aspect aplatie de la distribution des âges osseux de l'échantillon.

La moyenne des âges osseux des filles (80,69) est proche de celle des garçons (73,65), avec une simple différence de 7 mois seulement. Cette avance, ou décalage positif, en faveur des filles peut être expliquée par l'avancée générale de la maturation osseuse chez les filles par rapport aux garçons depuis la naissance jusqu'à l'âge adulte.

(2) La médiane de l'âge osseux est de 70 mois (5 ans et 10 mois) qui n'est pas loin de la moyenne (77,22), ainsi que la représentation graphique en boîte à moustaches qui se présente plus ou moins symétrique, un peu décalée vers l'âge minimum, ce qui donne un aperçu sur le degré de la normalité des âges osseux de la population.

L'AO minimum est un zéro (0) c'est-à-dire qu'on va assister à une région poignet-main « vide », sans aucune « trace » d'ossification ; en revanche, l'AO maximum est 193 mois, moins que l'AC de l'« ainée » de l'échantillon (203 mois), malgré qu'on va assister à une région poignet-main « presque fermée », ne se reste que des « retouches » avant l'acquisition d'un aspect d'adulte.

(3) Comme pour celle de l'AC, la moyenne de l'AO (ainsi que la médiane) présente une formule progressive et croissante, depuis la 1ère tranche d'âge à la 17ème (excepté la 8ème tranche).

En couplant le tableau 62 sur les statistiques de l'AO pour chaque tranche d'âge avec trois représentations graphiques (Fig. 172-174) on peut révéler comment les âges osseux s'étalent dans chaque tranche d'âge et dépassent quelquefois les âges civils correspondants. Par exemple, les sujets qui appartiennent à la 5ème tranche d'âge (civil), limitée entre 48-59 mois, leurs âges osseux dépassent cet intervalle, en bas (38 mois, soit 10 mois d'écart) comme en haut (70 mois, soit 11 mois d'écart), ou la 10ème tranche [108 mois - 119 mois], ses âges osseux dépassent l'intervalle, en bas (105 mois, soit 3 mois d'écart) comme en haut (132 mois, soit 13 mois d'écart).

Cette constatation est la même trouvée sur l'Atlas GP où le calcul des intervalles trouve une grande variabilité. Par exemple, si un garçon a un

AO estimé à 17 ans par l'Atlas de GP, il y a 95% de chances que son AC soit compris entre 14,25 et 18,78 ans [33].

B. La relation entre l'âge osseux et l'âge civil :

Dans le chapitre « Résultats », la relation AO et AC est démontrée sur les tableaux 63-67, et les figures 175-179.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) Concernant la comparaison des moyennes AC et AO : (Tab. 63 et 64)

Quand on compare la moyenne de l'AO (77,22) avec celle de l'AC (77,05) de l'échantillon, on remarque une différence très légère entre les deux valeurs, une différence de quelques jours, ce qui ouvre une fenêtre sur la nature de la relation entre les deux âges, l'osseux et le civil. En fait, cette constatation globale est la même pour les deux sexes (Tab. 53 et 60) : la moyenne des AO et AC chez les filles est respectivement [80,69 ; 80,60] et chez les garçons est [73,65 ; 73,40], une différence aussi de quelques jours, ce qui va nous ramener à la même déduction.

Pour prouver statistiquement la relation « forte » entre l'AO et l'AC, on applique un test statistique de comparaison de moyennes pour les mêmes individus du même échantillon, c'est le test de Student ou test-t. Ce test permet de vérifier le degré de la similarité des deux âges, civil et osseux.

Le test-t confirme statistiquement le rapprochement des valeurs des moyennes, comme suit : l'AC = 16,42 et l'AO = 16,71 avec une grande significativité ($p < 0,001$).

(2) Concernant le calcul de la différence AO-AC et sa moyenne : (Tab. 65)

Le calcul de la différence AO-AC montre une bonne estimation de l'AO à l'échelle populationnelle où la moyenne de la différence AO-AC est très petite (0,17 mois), avec une précocité de maturation très relative, prédominant chez les garçons (moyenne AO-AC = 0,25 mois) que chez les filles (moyenne AO-AC = 0,09 mois), le tout est en faveur d'une fiabilité bien forte de la méthode de Sempé.

Plus les valeurs AO et AC sont proches, plus la différence AO-AC est faible, et plus la corrélation entre AO et AC est forte ; et lorsque la moyenne de la différence AO-AC est petite, marque une correspondance importante entre l'AC de notre échantillon et l'AO calculé par la méthode de Sempé, selon les standards de la population de Sempé.

Bien évidemment, cette différence est un calcul important qui teste la précision de la méthode utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon, elle reflète l'écart qui peut exister entre l'AC de l'enfant (algérien) et les standards (tirés de l'échantillon français) adoptés par la méthode de Sempé pour calculer l'AO de cet enfant : un écart réduit ou inexistant est en faveur de cette fiabilité, et un

écart important signifie le contraire. Bien entendu, l'écart ici peut se voir dans les deux sens, positif et négatif :

- un écart positif, est expliqué par la supériorité de la valeur de l'AO par rapport à l'AC du sujet ;
- un écart négatif, est expliqué par l'infériorité de la valeur de l'AO par rapport à l'AC du sujet.

Les deux éléments considérés dans le calcul AO-AC, sont : sa « valeur faible » et aussi sa « valeur absolue », c'est à dire sa valeur numérique sans tenir compte de son signe, qu'il soit positif ou négatif.

L'étude Colavolpe et coll. (2005), faite pour comparer les trois méthodes d'estimation de la maturation squelettique (GP, TW, Sempé), affirme que la différence entre l'âge chronologique (AC) et l'âge osseux (AO) n'était significative qu'avec Maturos 4.0 CD chez le garçon (-3 mois) [pour notre étude cette différence est plus significative = 0,17 mois].

Par rapport à l'étude Chaumoître et coll. (2007) où l'estimation de l'AO chez trois populations (française, québécoise et marocaine) est faite par la méthode de Greulich et Pyle (GP), l'AO de notre population (0,17 mois) est bien estimé par rapport à celui de la population française (0,24 mois) et mieux estimé par rapport à la population québécoise (2,04 mois), celui de la population marocaine (- 7,2 mois) est en retard par rapport à l'AC.

Par rapport toujours à l'étude de Chaumoître, la différence AO-AC des garçons pour notre échantillon (0,25 mois) est inférieure par rapport à celle de la population québécoise (0,96 mois) mais supérieure par rapport à la population française (-1,56 mois) présentant un léger retard de maturation, et plus loin de celle de la population marocaine (-11,88 mois). Pour les filles, la différence AO-AC de notre échantillon (0,09 mois) est mieux « placée » par rapport à celle des populations québécoise (4,2 mois), française (2,64 mois) et marocaine (-3,24 mois).

Calfee et coll. (2010), dans leur étude, ont utilisé l'Atlas de GP pour déterminer de manière prospective l'âge squelettique dans un groupe de 138 adolescents américains en bonne santé, âgés de 12 à 18 ans. L'âge squelettique moyen était significativement supérieur à l'âge chronologique (moyenne de la différence AO-AC = 9,6 mois), mais moins représentative que la nôtre (AO-AC = 0,17 mois). L'étude trouve aussi que les garçons présentaient plus fréquemment une différence de l'AO de 2 ans ou plus que les filles, et dans notre étude la différence entre les âges osseux des deux sexes est de 7 mois uniquement.

L'étude de Santos et coll. (2011) a testé la fiabilité de deux méthodes répandues dans l'évaluation de l'ossification de la main et du poignet, GP et Sempé, sur un échantillon de la population portugaise, formé de 230 radiographies de la main et du poignet d'enfants et d'adolescents

portugais des deux sexes, âgés de 12 à 20 ans. L'étude trouve une différence AO-AC pour GP de 1.45 mois (garçons) et 0.28 mois (filles) ; et une différence AO-AC pour Maturos de 13.57 (garçons) et 20.57 (filles). Nos résultats apparaissent mieux estimés que celles de Santos (0,09 mois pour Filles et 0,25 mois pour Garçons).

Par rapport à l'étude de Alshamrani et Offiah (2020) faite sur les radiographies de la main de 392 enfants en grande Bretagne pour évaluer la maturation squelettique et tester l'applicabilité des méthodes GP et Tanner et Whitehouse (TW3). Cette étude a trouvé pour GP une moyenne de la différence AO-AC de -0,84 mois pour Filles et 1,56 mois pour Garçons ; et pour TW3, une moyenne de la différence AO-AC de -5,16 mois pour Filles et 0,24 mois pour Garçons. Ces résultats apparaissent moins estimés que les nôtres (0,09 mois pour Filles et 0,25 mois pour Garçons).

(3) Concernant la répartition de la moyenne de la différence AO-AC par rapport aux tranches d'âge : (Tab. 66 ; Fig. 175 et 176)

Il y a trois points à souligner :

- Le suivie des courbes de la moyenne de la différence AO-AC par tranches d'âge civil, avec ou sans distinction filles/garçons signale une « fluctuation » de la moyenne de la différence AO-AC, en fonction des tranches d'âge civil, avec un aspect « zigzagué » remarquable. Cette fluctuation arrive à son maximum dans la tranche d'âge 7 avec une moyenne AO-AC de 11,00 mois, et à son minimum dans la tranche d'âge 16 avec une moyenne AO-AC de (-) 13,25 mois.

  Cet aspect, qui est reporté sur le tableau et tracer sur les courbes, met le point sur la notion de la « variabilité de la maturation squelettique ». Cette dernière est observée sur les moyennes de la différence AO-AC de la population, sur leurs écarts-types populationnel qui oscillent entre 1 mois (tranche d'âge 13) et 9 mois (tranche d'âge 6 ou 7) et sur leurs étendues (différence entre valeur maximum et valeur minimum) qui oscillent entre 2 mois (tranche d'âge 13) et 26 mois (tranche d'âge 5, 6 ou 12).
- Statistiquement, deux écarts-types au-dessus ou au-dessous de la moyenne constitue la normalité et toutes les valeurs situées au-delà ou en deçà sont considérées comme anormales [18]. De façon générale, et comme règle empirique, le développement d'un enfant à un âge donné est dit « anormal » si il se situe au-delà de +2 DS ou en deçà de -2DS [27]. Néanmoins, l'expérience de la vie enseigne toutefois qu'une croissance retardée ou précoce peut encore entrer dans la norme dans une mesure à définir scientifiquement. Statistiquement, le nombre de personnes qui se répartissent de part

et d'autre de la valeur moyenne est d'égale importance [86]. Pour Sempé [137], « il est impossible de donner des règles absolues qui limitent la normalité de l'AO. Quelques auteurs ont suggéré qu'un écart-type (σ) - ou deux - au-delà de la moyenne était suspect ; d'autres qu'une différence de plus d'une année entre l'âge chronologique et l'âge osseux était anormale. En fait, beaucoup d'enfants normaux peuvent franchir l'une ou l'autre ou ces deux limites. L'examen de plusieurs séries de films apporte plus d'aide que l'examen d'un seul ».

La variabilité individuelle (des moyennes) de l'AO (Tab. 62) et (des moyennes) de la différence AO-AC (Tab. 66) dans notre population est remarquable : toutes les moyennes vérifiées relèvent de cette règle et oscillent entre +2 ET et -2 ET.

- A partir de la tranche d'âge « 13 », toutes les moyennes de la différence AO-AC se trouvent négatives, c'est-à-dire l'AO devient inférieur à l'AC, autrement dit, la vitesse de la maturation squelettique se ralentit par rapport à l'âge (civil) de l'individu. Ce ralentissement coïncide avec la période pubertaire, exactement entre 12-13 ans et plus, chez les filles comme chez les garçons.

(4) <u>Concernant la corrélation entre l'âge osseux et l'âge civil :</u> (Tab. 67 ; Fig. 177-179)

La corrélation entre l'AO et l'AC est vérifiée par le test de corrélation de Pearson (r) qui, de règle, varie entre 1 et (-) 1 : si « r » est proche de 1, il y a une forte corrélation positive, et si « r » proche de (-) 1 ceci signifie une forte corrélation négative.

Pour notre échantillon, on remarque une meilleure corrélation entre l'AO et l'AC, le coefficient de corrélation était franc et très proche de 1 ($r = 0,991$), avec une significativité considérable : $p < 0,001$ (la p value doit être $< 0,05$).

Ce coefficient chez les garçons est un peu mieux ($r = 0,984$) que chez les filles ($r = 0,979$).

On constate alors qu'il existe une relation significative entre AO et AC, et une corrélation très forte et positive.

Ces résultats sont mieux considérés par rapport à d'autres études comme celle de Jouve et coll. (2009) où l'analyse d'une série de 60 enfants indemnes de toutes pathologies hormonales a montré une discordance entre l'AO mesuré à la main (Maturos™) et l'AC, supérieur à 12 mois dans 30 % des cas.

Comme aussi remarquable par rapport à l'étude Chaumoître et coll. (2007), où la corrélation entre AO et AC dans les populations française et

québécoise est sensiblement inférieure (r > 0,93) par à la nôtre, de même que pour la population marocaine (r = 0,77).

L'étude Santos (2011) aussi a calculé la corrélation de Pearson et a trouvé de très bonne corrélation pour les deux méthodes : pour GP (Garçons : r=0,860 ; Filles : r=0,868), et pour Maturos (Garçons : r=0,768 ; Filles : r=0,669). Nos résultats s'accorde avec ceux de Santos, seulement notre corrélation est très forte (r=0,991). L'étude Santos conclut que les deux méthodes en question peuvent être utilisées avec succès aussi bien par des spécialistes que par des non-spécialistes et peuvent donner un bon degré de confiance.

C. La variabilité intra-observateur de la lecture de l'âge osseux :

La variabilité intra-observateur, nommée autrement la répétabilité, désigne le taux de différence entre deux lectures de l'AO réalisée par le même observateur (lecteur).

La variabilité de la lecture de l'AO sur le Maturos est un critère qui s'ajoute au critère précédent, la corrélation, pour vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé. Dans le chapitre « Résultats », l'étude de la variabilité intra-observateur de la lecture de l'AO par le Maturos est représentée sur les tableaux 68-72, et sur les figures 180 et 181.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) <u>Concernant la moyenne des nouveaux âges osseux et sa comparaison avec celle des âges osseux anciens :</u> (Tab. 68-70 ; Fig. 180)

A l'échelle populationnelle, les valeurs des moyennes AO sont très proches : celles des AO des 26 clichés radiographiques relus (71,62 mois) et celles des AO des 26 clichés radiographiques déjà lus (70,58 mois), les deux étaient très proches (une différence d'un seul mois), avec une avancée pour les nouveaux AO chez les filles (82,31) par rapport aux garçons (60,92).

Les valeurs proches des moyennes des anciens (AOa) et des nouveaux AO (AOn1) reflètent l'éventuelle corrélation entre les deux lectures, même avant de la calculer. En fait, pour tester statistiquement cette similarité, on utilise un test conçu pour comparer les moyennes, le test de Student ou test-t, qui permet de vérifier le degré de l'analogie des âges osseux des deux lectures (test t des échantillons appariés).

Les résultats étaient satisfaisants, puisque la relecture a révélé un t = 1,699 qui est en faveur de la non différence des échantillons appariés, confirmé par la valeur p = 0,102 (plus de 5 %), donc les échantillons AO ancien et AO nouveau sont semblables et non différents.

(2) Concernant la moyenne de la différence entre les nouveaux et les anciens âges osseux : (Tab. 71)

Cette moyenne est une autre preuve de la similarité des résultats des deux lectures et par conséquent de la précision de la méthode utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon, où un écart réduit ou inexistant est en faveur de cette fiabilité : dans notre échantillon, la différence AOn1-AOa = 1,04 (mois).

(3) Concernant la corrélation entre AOn1 et AOa : (Tab. 72 ; Fig. 181)

La recherche d'une éventuelle corrélation entre les âges osseux des deux lectures, le AOn1 et le AOa, révèle une relation très forte attestée par le coefficient de corrélation ($r = 0,999$), adjugé par un niveau de significativité considérable ($p < 0,001$).

Il existe alors une relation significative entre AOn1 et AOa, qui se traduit par une corrélation trop forte et positive.

D. La variabilité inter-observateur de la lecture de l'âge osseux :

La variabilité inter-observateur, nommée autrement la reproductibilité, désigne le taux de différence entre deux lectures de l'AO réalisée par un ou plusieurs autre (s) observateur (s) ou lecteur (s) différent (s) de celui ayant effectué la première lecture, c'est la double lecture indépendante.

Aussi, la variabilité de la lecture de l'AO sur le Maturos est un critère qui s'ajoute au critère précédent, de corrélation, pour vérifier la fiabilité de la méthode de Sempé.

Dans le chapitre « Résultats », l'étude de la variabilité inter-observateur de la lecture de l'AO par le Maturos est représentée sur les tableaux 73-77, et sur les figures 182 et 183.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) Concernant la moyenne des nouveaux âges osseux et sa comparaison avec celle des âges osseux anciens : (Tab. 73-75 ; Fig. 182)

Les valeurs des moyennes des nouveaux âges osseux de la variabilité inter-observateur (AOn2) et celles des âges osseux anciens (AOa) ont été très proches à l'échelle populationnelle : la moyenne de l'AOn2 des 14 clichés radiographiques relus valait 58,21 et celle de l'AOa des 14 clichés radiographiques déjà lus valait 59,21, une différence d'un seul mois. Avec une avance de la moyenne des AOn2 de 11 mois marquée chez les garçons (63,71) par rapport aux filles (52,71).

Ces valeurs, très proches, des moyennes des anciens et des nouveaux AO reflètent l'éventuelle parenté qui peut exister entre deux lectures faites par deux observateurs différents. En fait, pour tester statistiquement cette similarité entre moyennes, on a procédé à un test de comparaison

entre moyennes, qui est le test de Student ou test-t, qui s'applique ici sur des échantillons appariés (c'est-à-dire un seul échantillon et deux lectures), afin de vérifier le degré de l'analogie des âges osseux des deux lectures.

Nous avons trouvé un t = (-) 0,655 qui est en faveur de la non différence des échantillons appariés, confirmé par la valeur p = 0,524 (supérieur à 5 %), donc les moyennes des AOa et AOn2 de l'échantillon de 14 clichés radiographiques sont statistiquement semblables et non différents.

Il semble donc qu'il n'existe pas de différence significative entre les âges osseux des deux lectures AOn2 et AOa. Les résultats des deux lectures sont presque les mêmes bien qu'elles ont été faite par deux lecteurs différents.

(2) Concernant la moyenne de la différence entre AOn2 et AOa : (Tab. 76)

Cette moyenne est une autre preuve de la similarité des résultats des deux lectures et par conséquent de la précision de la méthode de Sempé utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon. Ce calcul trouve un écart très réduit en faveur de cette fiabilité : une différence AOn2-AOa = (-) 1 mois.

(3) Concernant la corrélation entre AOn2 et AOa : (Tab. 77 ; Fig. 183)

La recherche d'une éventuelle corrélation entre les âges osseux des deux lectures, le nouveau de la variabilité inter-observateur (AOn2) et l'ancien (AOa), révèle une relation très forte attestée par le coefficient de corrélation (r = 0,99), adjugé par un niveau de significativité considérable (p < 0,001).

Il existe alors une relation significative entre AOn2 et AOa, sous forme d'une corrélation trop forte et positive.

A propos des deux variabilités intra- et inter-observateurs :

Notre étude apporte la preuve de la répétabilité et de la reproductibilité de la lecture de l'AO par la méthode de Sempé, qu'elle soit, comme dans notre cas, par le même lecteur (après des années de la première lecture) ou par deux autres lecteurs, le tout en faveur de la fiabilité de cette méthode.

Par comparaison avec la méthode de GP, l'étude d'Adamsbaum et coll. (2008) a vérifié la reproductibilité inter- et intra-observateur de la méthode de GP en annonçant que cette méthode a un taux de reproductibilité inter- et intra-observateur acceptable en pratique quotidienne, [mais] lorsque les observateurs sont entraînés à une telle lecture, notamment en radiopédiatrie.

Cette dernière condition, est à l'encontre de la méthode de Sempé (le Maturos exactement) : il a été montré que l'utilisation de Maturos est facile, la preuve c'est que la procédure d'apprentissage pour un étudiant en médecine qui n'avait jamais utilisé le programme est facile, et qu'il n'y avait pas de différence significative entre ses résultats et ceux de l'auteur de la méthode, et que cette « option » d'apprentissage est incluse dans le Logiciel (rubrique : Simulation) [24].

L'étude de Colavolpe et coll. (2005) trouve que les variabilités intra- et inter-observateurs étaient non significatives pour les trois méthodes (GP, TW, Sempé) : pour la répétabilité testée sur 20 % de l'échantillon, les auteurs notent une différence moyenne ≤ 3 mois. Et pour la reproductibilité testée sur 10 % de l'échantillon, ils notent aussi une différence moyenne ≤ 3 mois ; et la variabilité inter- et intra-observateur du Maturos est moins que celle de TW et GP pour les filles, mais comparables pour les garçons. Pour notre étude, la différence moyenne été (1,04) pour la variabilité intra-observateur et (-1) pour la variabilité inter-observateur, donc bien estimé pour les deux variabilités.

L'étude de Santos et coll. (2011) affirme que les corrélations de la variabilité inter-observateur et intra-observateur étant toutes deux très fortes et que les deux méthodes, GP et Sempé, peuvent être facilement reproduites, et rapporte les résultats suivants concernant la différence AO nouveau et AO ancien pour deux observateurs : pour GP, 5,76 mois et -2,88 mois (garçons) ; 2,88 mois et -2,88 mois (filles) ; et pour Maturos, 0,48 mois et 1,44 mois (garçons) ; 11,04 mois et 12,96 mois (filles). Nos résultats sont mieux estimés (-2,57 mois pour filles ; et 0,57 mois pour garçons).

Dans une étude menée par King et ses collaborateurs dans laquelle l'âge osseux a été réalisé par trois opérateurs (observateurs) différents en utilisant soit la méthode GP soit la méthode TW, il y a eu une variabilité intraindividuelle significative avec des valeurs égales à 11,4 mois et 8,88 mois, respectivement [40]. Ces valeurs sont moins significatives, moins estimés par rapport à la valeur calculée par notre étude pour la variabilité intra-observateur (AO nouveau – AO ancien = 1,04).

Bien que la double lecture indépendante soit réalisée pour pallier la subjectivité de lecture des clichés radiographiques, tous les résultats concernant la variabilité intra- et surtout inter-observateur mettent l'accent sur le principe conservé de l' « objectivité » de la méthode de Sempé et que son utilisation pour la lecture de l'AO une ou deux ou même trois fois, par le même lecteur ou par un ou deux autres, ne change pas le résultat final que par un mois ou quelques jours.

E. Le temps de lecture Maturos des clichés radiographiques :

Le temps de lecture de l'âge osseux est un autre critère de fiabilité de la méthode de Sempé, testé et calculé par notre étude. Ce temps, quand il est court, désigne la simplicité de la manipulation et la facilité d'apprentissage, deux éléments importants dans l'applicabilité de la méthode.

Dans le chapitre « Résultats », la durée de la lecture de l'AO par le Maturos est démontrée sur le tableau 78.

La durée moyenne de la lecture des clichés radiographiques par Maturos est relativement minime : 199,15 secondes pour le même lecteur (soit 3 min et 20 sec), et 194,21 secondes pour des lecteurs différents (soit 3 min et 15 sec). Ce

temps peut être allongé, vers 4 minutes ou plus, pour la lecture d'un cliché « chargé » où tous les indicateurs osseux sont présents à des degrés différents, comme il peut être raccourcit, à 3 minutes ou moins, pour la lecture d'un cliché « vide » ou presque où la plupart des indicateurs osseux n'ont pas encore ossifié. Les mêmes résultats sont obtenus pour les deux sexes.

Mais en fait, quelque soit sa durée, la lecture de l'AO doit prendre son temps pour avoir un résultat très proche de la réalité, un AO fiable ; il faut rappeler que la lecture d'un cliché radiographique nécessite un passage « en saut » d'un indicateur à l'autre parmi les 22 indicateurs osseux, avec le « clic » instantané et parallèle sur le logiciel Maturos du résultat de la lecture de chaque indicateur.. une opération qui nécessite du temps (!!).

Une étude française [42] a mené un travail comparatif des trois méthodes d'évaluation de l'AO (GP, TW, Sempé), calcule un temps de lecture, pour TW et Maturos, comparable à le nôtre (3 à 4,5 min) mais différent à celui de GP (1,5 min).

Pour l'étude de Cavallo et coll. (2021), la méthode de GP est très simple et rapide, nécessitant environ 1,4 min pour l'évaluation ; La méthode Tanner-Whitehouse (TW) est plus complexe et prend plus de temps, nécessitant environ 7,9 minutes si la méthode TW2 est utilisée.

Par ailleurs, au contraire, des études critiquent la durée longue qui est consommée par la méthode de Sempé lors de la lecture d'AO, pour eux elle nécessite au moins 10 minutes par cliché [89], et pour d'autres [4, 39], la méthode de lecture de l'AO allonge de façon très importante le temps de lecture sans apporter un gain significatif de précision.

De sa part, le Professeur Sempé [137], a commenté autrement l'idée du « temps nécessaire de la lecture d'un cliché radiographique pour âge osseux » et « l'importance d'une courte durée comme critère de fiabilité d'une méthode », en disant que « l'objection selon laquelle le système proposé serait trop long ne paraît pas défendable dans la mesure où l'on veut bien accepter de se laisser persuader que la lecture d'une radiographie a une autre signification que comptable ». Il a dit aussi [137] « une personne moyennement entraînée a besoin de 5 à 10 minutes pour décrypter complètement un cliché et, s'il y a comparaison de films successifs, celà diminue le temps par cliché : quel examen de laboratoire porteur d'autant d'information ne nécessite-t-il pas plus de temps, voire de compétence ? ».

L'âge osseux en fait, n'était jamais un acte « d'urgence » pour insister sur le temps de lecture, certes cette « durée de lecture » est importante dans les « options » de choix d'une méthode, mais l'AO nécessite une précision et la précision nécessite du temps selon le détail et les particularités rencontrées sur chaque cliché radiographique, par exemple évaluer un cliché pathologique (un retard ou une avance de croissance) ou à la recherche d'un âge dans un cadre médico-légal.

Ce qui compte dans une lecture de l'AO est la compétence, la précision et l'objectivité… et rien d'autre.

F. Le Maturos en pratique : des qualités, mais des défauts inhérents au logiciel et non à la méthode

En se basant sur le parcours modeste de son utilisation dans cette étude, en quelques lignes, les quelques points avantageux du logiciel Maturos :

- Le Maturos est simple à l'entrainement ou à l'auto-entrainement ;
- Il est rapide et simple dans sa manipulation, et on peut le manipuler sans entraineur, en exploitant la rubrique « Simulation » insérée dans le logiciel ;
- Il est très utile : par rapport à l'âge civil de la radio à exploiter, le logiciel expose sur l'écran devant le lecteur, trois propositions (sous forme de degrés, mini-radios et schémas) à choisir pour l'état de l'indicateur ;
- Il est aussi utile, il défile automatiquement les séquences des indicateurs ;
- Enfin, deux comptes rendus, ordonnés, détaillés, avec les notes des indicateurs et la représentation graphique, à côté de l'AO, du taux de maturation et de l'ET.

Bien que le logiciel Maturos a permet l'automatisation des calculs et à faciliter l'accès à la méthode de Sempé [24], on peut lui reprocher quelques remarques d'ordre technique :

- Au début, il présente un « défaut technique » dans sa configuration minimale requise, où son installation nécessite un système d'exploitation un peu ancien (!!) : le Windows XP, le Windows 98 ou autre version antérieure.
- La tendance à l'allongement des durées de terminaison de l'ossification, fait que le décalage positif est plus grand que l'inverse. [Ce] qui a illusionné l'informaticien responsable du programme « Maturos 4 » en l'amenant à fixer 100 % de maturation complète au niveau du poignet et de la main à un âge absolument excessif : 30 ans aussi bien chez les femmes que chez les hommes ; c'est en réalité 20 ans et 22 ans qui auraient pu être proposés [135].
- Le point repère sur la courbe de référence conserve une position neutre à 18 ans, ce qui est une autre défaillance du programme. Ainsi, pour les deux ou trois demi degrés généralement en cause dans la phase finale habituelle de la maturation squelettique des filles et des garçons, il n'est pas possible d'être entièrement affirmatif [135].

(3) L'ÉVOLUTION DE LA MATURATION SQUELETTIQUE

Le titre présent, du début à la fin, souligne la notion du « temps » dans le parcours de l'évolution de la maturation squelettique : il met l'accent sur l'importance du « temps » pour tracer le « schéma d'ossification », l'intérêt du « temps » dans la recherche des « critères osseux de la puberté » et la priorité du « temps » pour ordonner et éditer un « Atlas de maturation squelettique ».

Ce regard envers une « dimension » virtuelle, matérialisée par l'ossification progressive des maquettes cartilagineuses décelable par la radiographie, trouve tout son intérêt dans la pratique clinique quotidienne : un AO est le reflet de la maturation osseuse des points d'ossification, isolés puis rassemblés, traduit par les mois et les années et utilisé dans le cadre de l'évaluation d'une croissance ou dans le cadre de la détermination d'un âge.

Le « temps » alors, est l'essence de la maturation squelettique, il l'accompagne et permet la détermination de l'AO.

Pour Georges Olivier (1962) « c'est qu'en étudiant la croissance de la main et du poignet qu'on a trouvé les lois de la croissance chez l'enfant et l'adolescent… cela nous a entrainé à utiliser le " temps " comme un facteur de l'être, au même titre qu'un caractère anatomique ».

A. Le schéma de l'évolution de la maturation squelettique ou « schéma d'ossification » :

Les acteurs de la maturation squelettique sont les os courts, les épiphyses et les sésamoïdes du poignet et de la main. Ces indicateurs osseux de la maturation, « à cause de leur ordre d'apparition... marquent leur avance vers la maturité » [139]…

Et pour que l'analyse de la maturation osseuse soit possible, sans le risque de fausser la comparabilité des images, Sempé et Pavia exigent que cet « ordre d'apparition » doit être (1) « irréversible », où « la maturation osseuse ne saurait régresser et les acquis constatés le sont une fois pour toutes », (2) « définitif », « tant qu'un type d'indicateurs est en cause, ce qui va de soi », et (3) « régulier », mais relativement « puisque les intervalles entre chaque indicateur sont variables » [137, 139].

Pour notre échantillon, l'ordre d'apparition des indicateurs osseux a respecté tous ces critères initiaux.

1. **Concernant les dates d'évolution de la maturation squelettique :**

   « L'apparition, puis la fusion des différents points d'ossification suivent une séquence temporo-spatiale bien définie, de la naissance à la maturité » [69], c'est pour cela que « le principe de l'évaluation de l'âge osseux repose

sur la détermination de la chronologie d'apparition des noyaux d'ossification des os courts et épiphysaires des os longs, de leur croissance, de leur modelage et de la disparition des cartilages de conjugaison par rapport à des données de référence [2].

Notre étude a abouti à de nombreux résultats concernant les intervalles des dates d'apparition, de présence et de terminaison des points d'ossification des indicateurs osseux. Ces résultats doivent être évalués, en les confrontant avec ceux de l'étude et de l'Atlas de Sempé [137, 139].

Tableau 112 : La comparaison des intervalles temporels de l'étude avec ceux de la méthode de Sempé, pour Filles

F	Intervalles temporels chez Sempé				Intervalles temporels de notre étude			
	A	P	t / f	T / F	A	P	t / f	T / F
CAP	0-6	1-9 120-174	108-162	132-174	3-6	7-138	139-191	ND
HAM	1-12	3-15 108-150	120-162	132-174	3-11	12-131	132-167	167-191
TRI	6-60	9-66 120-156	132-174	150-180	12-35	36-167	139-179	180-191
LUN	21-84	27-90 126-156	132-180	150-186	36-59	36-155	156-191	ND
SCA	30-90	48-96 126-156	132-180	150-186	48-71	48-167	151-179	180-191
TRZ	27-90	36-96 138-162	138-186	156-192	55-71	60-167	163-180	175-191
TRZD	36-94	ND	ND	ND	55-71	55-167	163-186	187-191
PISI	84-138	114-162		132-168	103-131	120-155		151-191
RAD	3-24	9-27 138-186	156-216	174-216	7-23	24-167	/	168-191
ULN	48-96	60-102 156-204	168-222	180-222	67-90	67-162	/	168-191
M-I	12-36	18-42 144-174	150-186	162-192	19-23	24-155	156-167	163-191
P1-I	15-36	21-42 144-180	150-192	156-198	19-23	24-155	156-167	163-191
P2-I	6-27	12-30 144-174	150-180	156-186	6-18	19-155	151-155	156-191
SSM	114-162	132-180		150-186	132-143	139-155		156-191
M-III	9-27	15-30 144-174	150-192	162-204	6-18	19-155	156-167	156-191
M-V	12-36	18-42 150-186	156-198	168-204	12-23	24-162	/	156-191
P1-III	6-21	12-24 144-180	150-186	162-192	6-18	19-155	156-167	156-191
P1-V	9-27	15-30 138-180	150-186	162-192	6-18	19-155	/	156-191
P2-III	9-30	15-36 144-186	150-198	162-204	6-23	19-162	156-167	156-191
P2-V	9-48	21-54 150-180	156-192	162-198	19-42	24-155	156-167	156-191
P3-III	12-36	21-42 138-174	150-186	150-186	6-23	24-155	/	156-191
P3-V	18-42	24-48 138-174	150-186	150-192	19-42	36-155	/	156-191

Tableau 113 : La comparaison des intervalles temporels de l'étude avec ceux de la méthode de Sempé, pour Garçons

G	Intervalles temporels chez Sempé				Intervalles temporels de notre étude			
	A	P	t / f	T / F	A	P	t / f	T / F
CAP	0-9	3-9 120-174	120-198	144-204	6-11	7-162	156-198	186-198
HAM	1-12	3-15 126-168	138-186	150-192	6-11	7-150	151-198	168-198
TRI	12-60	15-66 132-180	138-198	150-204	7-47	36-162	163-198	187-198
LUN	15-90	21-96 144-186	156-198	162-204	31-59	43-174	168-198	ND
SCA	42-102	48-96 150-180	150-192	162-198	60-66	67-174	168-198	180-198
TRZ	42-114	54-120 150-186	150-198	168-204	60-66	67-174	168-198	187-198
TRZD	48-102	56-124 150-190	150-200	172-208	67-78	72-174	168-191	180-198
PISI	102-168	132-186		150-192	127-143	144-174		175-198
RAD	6-30	9-36 156-198	174-222	186-234	7-23	24-174	168-198	ND
ULN	66-108	72-114 168-210	168-228	192-234	79-95	84-174	168-198	ND
M-I	21-66	27-72 156-198	168-210	180-216	31-47	48-174	168-198	ND
P1-I	21-48	30-60 156-204	174-210	180-216	31-47	31-174	168-198	187-198
P2-I	6-42	15-54 156-198	162-204	174-204	19-35	24-174	168-191	187-198
SSM	132-180	150-192		156-198	151-162	156-174		175-198
M-III	12-42	18-48 162-198	162-210	180-216	19-30	19-174	168-179	180-198
M-V	18-48	18-42 162-204	168-216	180-222	19-42	24-174	168-179	180-198
P1-III	9-30	12-36 162-204	168-210	180-216	19-23	19-174	168-179	180-198
P1-V	12-42	18-42 162-204	168-210	174-210	19-35	24-174	168-179	180-198
P2-III	12-48	21-54 162-210	174-210	180-210	19-35	19-174	168-179	180-198
P2-V	21-66	21-54 162-204	174-210	180-210	19-47	48-174	168-179	180-198
P3-III	15-54	24-60 144-198	162-204	168-204	19-47	19-174	168-191	187-198
P3-V	24-66	30-72 156-198	162-204	174-210	31-47	48-174	168-191	187-198

N.B. :

- **Les tableaux de comparaison**, en ci-après (Tab. 112 et 113) : Nous avons refait les mêmes abréviations concernant les indicateurs osseux, les phases d'évolution et les couleurs correspondantes (voir : Tab. 79 et 80).
- Les intervalles temporels sont exprimés en **mois**.
- **ND** = Non disponible
- Par rapport aux **« intervalles de Sempé »**, qui sont larges, nous allons voir est-ce que nos intervalles se situent à l'intérieur (bonne correspondance) ou à l'extérieur (mauvaise correspondance) des intervalles de référence.

Après un passage minutieux sur tous ces chiffres, en comparant les dates et les intervalles des dates de l'évolution de la maturation osseuse de notre étude avec ceux de la méthode de Sempé, nous pouvons constater une correspondance remarquable de chiffres entre l'ensemble des dates, avec quelquefois une parfaite correspondance (des dates complètement identiques). La plupart de nos intervalles temporels se trouvent inclus dans ceux de Sempé, avec un très peu de « dépassement » de dates qui n'excède pas quelques mois et qui serait en rapport avec le nombre modeste de clichés radiographiques de notre collection.
Cette correspondance de « chiffres » explique l'applicabilité de la méthode de Sempé pour notre échantillon.
En plus des dates d'évolution des indicateurs osseux de la maturation, les intervalles temporels de Sempé, ainsi reportés (Tab. 112 et 113), révèlent plusieurs observations qui confirment les résultats de notre étude :

- Le premier point d'ossification à apparaitre, au niveau du poignet et de la main, est carpien, c'est le capitatum. Ce dernier pourrait être considéré comme l'os « déclencheur » du processus d'ossification du poignet et de la main ;
- Les autres os courts du carpe viennent derrière, os après os, jusqu'au pisiforme qui arrive en retard, laissant imaginer une véritable « course », sur un hippodrome spiral anti-horaire, et autour d'un os central qui se comporte comme un pivot. Sempé précise ici [137] que le décalage des os du carpe est circulaire anti-horaire pour les quatre premiers osselets du carpe, et horaire ou nul pour les trois derniers osselets ;
- Le capitatum et l'hamatum apparaissent, évoluent et se terminent ensemble ou presque ensemble, formant ainsi un sous-groupe particulier dans le groupe des os du carpe ;
- Du même, le scaphoïde, le trapèze et le trapézoïde apparaissent, évoluent et se terminent ensemble ou presque ensemble, formant ainsi un deuxième sous-groupe particulier dans le groupe des os du carpe ;
- Concernant les tendances d'évolution de la maturation squelettique, mise à part l'aspect circulaire carpien, Sempé rapporte d'autres tendances sous le nom de « gradients de maturation » [137] qui recoupent nos résultats :
    - La précession horizontale de l'épiphyse distale radiale sur l'ulnaire ;
    - La primauté verticale de l'épiphyse de la deuxième phalange du pouce ;
    - L'avance horizontale relative du médius sur l'auriculaire ;

- La précession verticale des épiphyses des premières phalanges des doigts sur celles des métacarpiens correspondants ;
- La soudure princeps de l'épiphyse de la deuxième phalange du pouce et des épiphyses des troisièmes phalanges des doigts ;
- La séquence obligée de l'épiphyse distale ulnaire, du pisiforme et des sésamoïdes.

- Le « décalage » est remarquable entre filles et garçons concernant toutes les phases de l'évolution de la maturation squelettique, depuis l'apparition des points d'ossification jusqu'à la fermeture de cet évolution. Ce décalage, qui est de quelques mois à deux ans voire même trois ans plus tôt chez les filles que chez les garçons, « est aisé de s'en rendre compte par simple confrontation des chiffres, l'avance relative des filles est patente et doit même être admise pour le capitatum […]. Aucun des indicateurs n'y échappe » [137, 139].
  Les filles murissent plus vite que les garçons et l'année osseuse comprend plus d'évènements et l'acquisition d'un nombre plus grand d'indicateurs de maturité chez la fille que chez le garçon, étant bien sur entendu que le résultat final, la maturité adulte sera identique quoique décalée dans le temps ; il nous faut donc une année osseuse par sexe [137].
- En se basant sur les dates de Sempé et celles de notre étude, malgré les différences multiples qui peuvent exister (séculaires, géographiques, nutritionnelles, environnementales, etc…), nous pouvons confirmer que tous les indicateurs osseux du poignet et de la main (os courts, épiphyses et sésamoïdes) respectent un intervalle temporel et un ordre d'apparition et d'évolution bien tracés et bien constants.

Une deuxième comparaison de nos dates a été faite avec d'autres études, cette comparaison a abouti aux mêmes conclusions que celles de Sempé :

- Dans l'étude de Bouhours-Nouet et coll. (2015), les auteurs rappellent que la fin de la croissance survient lors de la disparition du cartilage de croissance et de la soudure épiphyso-métaphysaire, correspondant à un AO de 15 ans (180-191 mois) pour la fille, 16 ans (192-203 mois) pour le garçon, comme pour notre étude ;
- Pour Bouchard (2006), la fusion des épiphyses se fait de façon centripète, en commençant par les épiphyses distales (P3, puis P2 et P1, puis les métacarpiens III et V), l'ulna et enfin le radius.

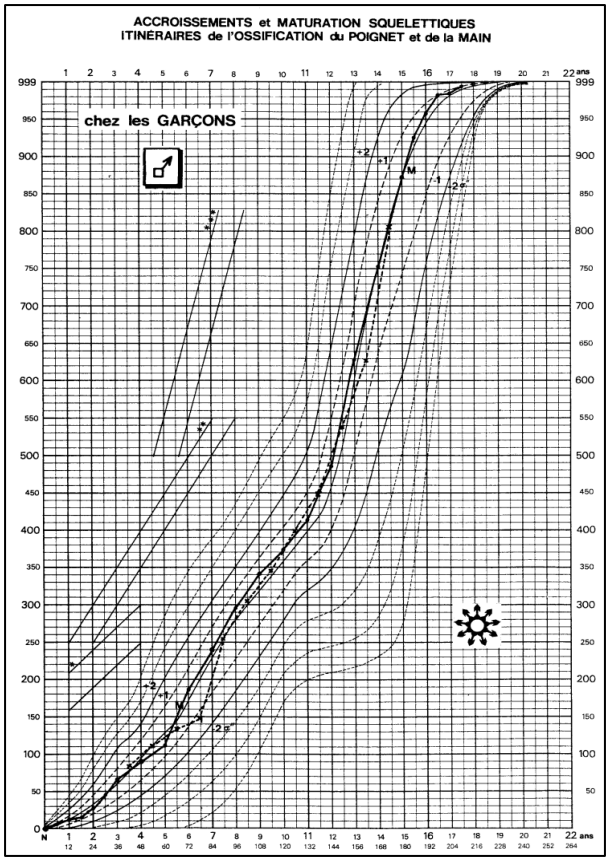
2. Le taux de maturation :

La représentation du taux de la maturation squelettique, chiffrée en pourcentage (Tab. 79 et 80) et graphique en courbe (Fig. 184), qui fait appel aux résultats de notre étude est comparée avec la représentation graphique

de la méthode de Sempé [137] qui, pour lui, « traduit éloquemment la précocité et l'importance de la différentiation sexuelle » [139].
Nous constatons la correspondance parfaite de nos courbes pour filles et garçons avec celles de Sempé, cette correspondance sera bien visible si nous espacerons les pourcentages des taux de maturation sur l'axe des ordonnées.
Une lecture comparative sur les graphes de Sempé, note une « superposition » des résultats dans les points suivants :

- Le taux de maturation évolue progressivement, avec un net décalage en faveur des filles par rapport aux garçons, dès la naissance (taux à un an chez les filles = 2, chez les garçons = 1) ;
- La première moitié (50 %) du taux de maturation est acquise vers 10 ans et demi année d'AO chez les filles, et vers 12 ans d'AO chez les garçons ;
- La deuxième moitié du taux de maturation, est presque acquise dans 5 ans (98 %) chez les filles, à 15 ans et demi d'AO, et dans 4 ans (95 %) chez les garçons, à 16 ans d'AO.

Par ailleurs, les taux de maturation élevés observés sur notre échantillon (plus de 98 % chez les filles de moins de 17 ans ; plus de 95 % chez les garçons de moins de 17 ans) avec la fusion épiphyso-diaphysaire de la plupart des os longs et la terminaison de la plupart des os du carpe, toutes ces constatations peuvent être expliquées par les changements séculaires qui conduisent à une maturité précoce par rapport aux décennies antérieures. En fait, ce « phénomène » est confirmé dans le Rapport de l'EASO (European Asylum Support Office) qui rapporte que « certaines preuves suggèrent que les enfants se développent plus tôt aujourd'hui que dans les années 1930 […]. Le Royal College of Paediatrics and Child Health (RCPCH) indique que le squelette d'un garçon d'aujourd'hui arrive à maturité à l'âge de 16 ou 17 ans et celui d'une fille à l'âge de 15 ou 16 ans. Cette norme diffère dans les deux cas de deux à trois ans par rapport à l'atlas GP » [60].



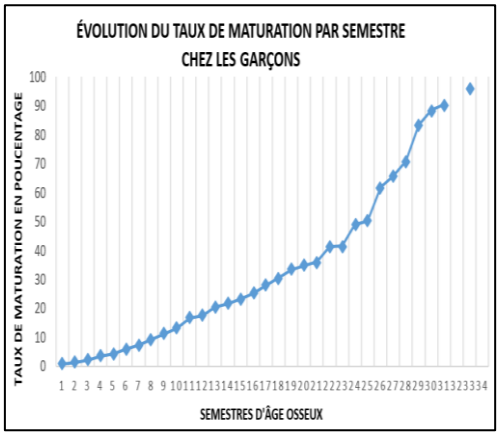
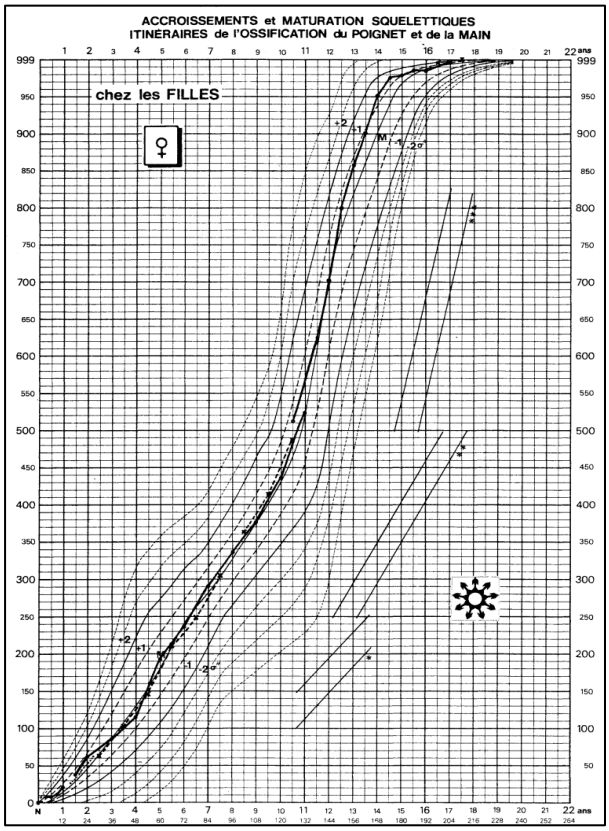


Figure 201 : L'évolution du taux de maturation chez les garçons, pour Sempé (à gauche) et pour notre étude (à droite) (Présentation graphique en courbe)



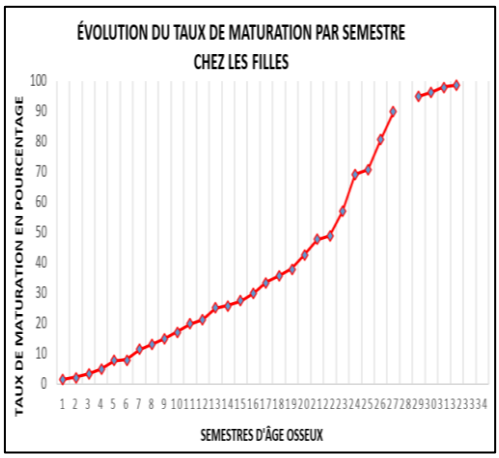


Figure 202 : L'évolution du taux de maturation chez les filles, pour Sempé (à gauche) et pour notre étude (à droite) (Présentation graphique en courbe)

B. Les critères osseux radiologiques de la puberté :

La puberté, période transitoire de l'enfance à l'état adulte, s'exprime sur le plan clinique par un développement des caractères sexuels secondaires et par une accélération de la vitesse de croissance staturale, et conduit à l'acquisition des fonctions de reproduction [30]. En parallèle, le squelette, comme beaucoup de composants de l'organisme, subit des changements importants lors de la puberté, portant sur la maturation, la morphologie et la minéralisation [89].

La puberté, comme la maturation osseuse, débute précocement chez la fille que chez le garçon [137] : elle commence chez la fille dans l'intervalle de 8 à 13 ans, et chez le garçon dans l'intervalle de 9 à 14 ans [2, 4, 30, 89] ; et dure 6 ans pour s'achever vers 16 ans chez les filles et vers 18 ans chez les garçons [34].

Bien que l'étude de la puberté et l'appréciation du développement pubertaire soient essentiellement physique, radiologique et hormonale [4], l'évaluation de la maturation squelettique correspondante, vu sur un cliché radiologique du poignet et de la main porte d'information pertinente dans l'appréciation du développement pubertaire, normal ou pathologique [89].

Dans notre étude, la recherche qui a été faite sur trois critères osseux radiologiques, l'os pisiforme, l'os sésamoïde du pouce et l'hamulus de l'os hamatum, et leur rapport avec le déclenchement « présumé » de la puberté a révélé des observations intéressantes. En fait, ces critères maturatifs semblent être utiles dans la compréhension et le suivi de la période pubertaire.

Pour Sempé [137], l'« apparition [du pisiforme] peut aller jusqu'à être contemporaine de l'entrée en adolescence », et « il est à relever que cette incurvation osseuse du carpe [hamulus] commence justement aux approches de l'adolescence »… mais concernant l'os sésamoïde du pouce, « il faut admettre que la corrélation avec l'adolescence est loin d'être absolue : elle est d'ailleurs source de confusion et d'erreur de diagnostic et de pronostic évolutif ».

Selon nos résultats (Tab. 95) :

- Aucun des trois critères n'est apparu chez les garçons, avant l'âge de 9 ans et 8 mois, cet âge est reculé chez les filles à moins de 8 ans, un décalage de deux ans presque ;
- Les premiers critères osseux qui apparaissent sont le pisiforme et l'hamulus de l'os hamatum, ils « naissent » ensemble, à 8 ans chez la fille et à 9 ans et 8 mois chez le garçon ;

  Pour le pisiforme, son apparition reste « instable » ou mieux dire « variable » sur une durée de 1 an chez les filles, et 1 ans et 2 mois chez les garçons, avant que la présence du pisiforme soit constante ;

  Pour l'hamulus, son apparition reste « instable » ou mieux dire « variable » sur une durée de 6 mois chez les filles, et 11 mois chez les garçons, avant que la présence de l'hamulus soit constante ;

- L'os sésamoïde de pouce apparait à 10 ans et 1 mois chez la fille et à 11 ans et 11 mois chez le garçon, cette apparition va rester « instable » ou mieux dire « variable » sur une durée de 2 ans et 7 mois chez la fille, et de 1 an et 9 mois chez le garçon, avant que la présence du sésamoïde soit constante.
- Toutes ces dates semblent coïncider avec le déclenchement de la puberté.

En comparant ces résultats avec les intervalles des dates d'apparition chez Sempé (voir : Tab. 112 et 113), nous allons obtenir le tableau suivant (Tab. 114) :

Tableau 114 : La comparaison des intervalles temporels (par AC) d'apparition des trois critères osseux de puberté chez Sempé et dans l'étude, pour Filles et pour Garçons

	Intervalles d'apparition chez Sempé		**Intervalles d'apparition dans notre étude**	
	Filles	**Garçons**	**Filles**	**Garçons**
Os pisiforme	7 ans, 0 mois 11 ans, 6 mois	8 ans, 6 mois 14 ans, 0 mois	8 ans, 0 mois 9 ans, 0 mois	9 ans, 8 mois 10 ans, 10 mois
Os sésamoïde	9 ans, 6 mois 13 ans, 6 mois	11 ans, 0 mois 15 ans, 0 mois	10 ans, 1 mois 12 ans, 8 mois	11 ans, 11 mois 13 ans, 8 mois
Hamulus de l'os hamatum	6 ans, 6 mois 11 ans, 0 mois	7 ans, 0 mois 13 ans, 0 mois	8 ans, 0 mois 8 ans, 6 mois	9 ans, 8 mois 10 ans, 7 mois

Ce tableau comparatif nous permet de constater une correspondance remarquable entre l'ensemble des dates, qu'elles soient chez les filles ou chez les garçons : tous les intervalles temporels de notre étude se trouvent inclus dans ceux de Sempé, sans aucun « dépassement » de dates. Nos résultats s'alignent bien avec les données de la méthode de Sempé.

Une étude faite principalement sur l'os sésamoïde, par Chaumoître et coll. (2008), aboutit à des résultats englobant les nôtres. Pour eux, les valeurs limites au sein de leur échantillon étaient 10 - 15,1 ans chez les garçons et 8,8 - 15,2 ans chez les filles.

Pour terminer avec les critères osseux radiologiques de puberté, trois remarques importantes doivent être notées :

a) Bien que les résultats soient intéressants, ils ne sont pas concluants parce que ça nécessite un examen physique de confirmation (voire même hormonal et échographique) à la recherche des caractères sexuels secondaires en rapport avec la puberté, ce qui peut confirmer nos résultats ;
b) Bien qu'ils coïncident avec le déclenchement de la puberté, la maturation des trois critères osseux de la puberté ne doit pas être prise isolément de la maturation squelettique du poignet et de la main et doit être corrélée à la maturation globale de l'enfant [34] ;
c) Bien qu'il soit complémentaire à l'interrogatoire et à l'examen physique, l'examen anatomo-radiologique des critères de puberté, demandé dans le

cadre d'un âge osseux, présente une pondération non négligeable et permet d'affirmer ou d'infirmer, par la simple ossification de la main, l'acquisition de l'enfant de sa puberté puisque ces critères coïncident avec le déclenchement de la puberté, à défaut omniprésents durant l'âge pubertaire.

C. L' « Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique » :

Pour établir un système de références pour maturation osseuse, un Atlas par exemple, Sempé exige qu' « il importe de pouvoir disposer de lots de radiographies du poignet et de la main obtenus chez des sujets indemnes d'une maladie mettant en jeu la croissance (maladies endocriniennes surtout) » [132]. La radiographie pour qu'elle devient l'étalon, doit être « semestrielle habituelle avec ses variations : ce n'est plus un âge osseux trompeur, mais un gain de maturation osseuse pendant un temps donné [139].

En fait, pour faire un examen de maturation osseuse (âge osseux), « il importe de disposer de standards donnant les âges habituels d'apparition et de soudures des points d'ossification, [en distinguant] les garçons et les filles [puisque] la vitesse de maturation osseuse étant plus rapide chez ces dernières, et indiquer en plus de la maturation moyenne, les limites des variations physiologiques » [137].

Une fois l'Atlas est édité, enrichi d' « une série de reproductions des divers aspects successifs des régions choisies, pour leur comparer le film à analyser et en conclure une probabilité d'appariement : le sujet serait réputé avoir l' « âge osseux » le plus proche d'une certaine radiographie type portant un âge chronologique » [135].

Devant nous **quatre Atlas de maturation squelettique de la région du poignet et de la main**, illustrés et commentés, qui constituent une référence dans ce domaine :

- « **Pocket atlas of skeletal age** »
  Auteurs : De Roo T. et Schröder H. J.
  Editeur et Année : The Hague, 1976
- « **Atlas de la maturation squelettique** »
  Auteurs : Sempé M. et Pavia C.
  Editeur et Année : Simep, 1979
- « **Skeletal Development of the Hand and Wrist, A Radiographic Atlas and Digital Bone Age Companion** »
  Auteurs : Gaskin C. M., Lowell Kahn S., Bertozzi J. C., Bunch P. M.
  Editeur et Année : Oxford University Press, 2011

- « **Hand Bone Age - A Digital Atlas of Skeletal Maturity** »
  Auteurs : Gilsanz V., Ratib O.
  Editeur et Année : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012

Dans les lignes qui suivent, nous allons comparer notre Atlas aux Atlas cités ci-dessus, en se basant sur quelques points représentatifs.

1. **Pocket atlas of skeletal age**
   a. Langue: Anglais
   b. Nombre de page : 129
   c. Contenu : Anatomie de la région du poignet et de la main, Age osseux des garçons, Age osseux des filles
   d. Nombre de séquences : 31 séquences masculines, 27 séquences féminines
   e. Intervalles des séquences : chaque trimestre jusqu'à 2 ans, puis chaque 6 mois jusqu'à 7 ans, enfin chaque année à partir de 7 ans jusqu'aux 18 ans (pour les deux sexes)
   f. Commentaires sur séquences : Oui
2. **Atlas de la maturation squelettique**
   a. Langue : Trilingue (Français, Espagnol, Anglais)
   b. Nombre de page : 239
   c. Contenu : Introduction à la maturation squelettique, Séquences masculines, Séquences féminines
   d. Méthode utilisée : Méthode de Sempé
   e. Taille de l'échantillon : 497 sujets et 5011 clichés radiographiques
   f. Nombre de séquences : 44 séquences masculines, 41 séquences féminines
   g. Intervalles des séquences : chaque trimestre avant 2 ans et 6 mois, puis chaque 6 mois jusqu'aux 18 ans (Garçons) et 17 ans (Filles)
   h. Commentaires sur séquences : Oui
3. **Skeletal Development of the Hand and Wrist, A Radiographic Atlas and Digital Bone Age Companion**
   a. Langue: Anglais
   b. Nombre de page : 131
   c. Contenu : Détermination de l'âge osseux, Standards masculins, standards féminins
   d. Méthode utilisée : Méthode de Greulich et Pyle
   e. Nombre de séquences : 32 séquences masculines, 27 séquences féminines
   f. Intervalles des séquences : (séquences perturbées surtout pour les filles) chaque trimestre jusqu'à 1 an et 6 mois, puis chaque 6 mois

jusqu'à 5 ans, puis chaque année à partir de 11 ans, puis chaque 6 mois à 1 an jusqu'à 19 ans (Garçons) et 18 ans (filles)

g. Commentaires sur séquences : Oui

4. Hand Bone Age - A Digital Atlas of Skeletal Maturity

a. Langue: Anglais
b. Nombre de page : 96
c. Contenu : Développement osseux, Indicateurs squelettique de la maturation, Atlas numérique de l'âge osseux, Images de référence
d. Méthode utilisée : Méthode de Greulich et Pyle
e. Nombre de séquences : 29 séquences masculines, 29 séquences féminines
f. Intervalles des séquences : séquences perturbées jusqu'à 3 ans, puis chaque 6 mois jusqu'à 6 ans, puis chaque année jusqu'aux 18 ans (pour les deux sexes)
g. Commentaires sur séquences : Non
h. Caractéristique particulière : l'atlas contient un logiciel informatique de lecture de l'âge osseux sous forme d'une application payante téléchargeable sur mobile et tablette

5. Notre Atlas anatomo-radiologique de la maturation squelettique :

a. Langue : Français
b. Nombre de page : 69
c. Contenu : Anatomie du poignet et de la main, Séquences masculines, Séquences féminines
d. Méthode utilisée : Méthode de Sempé
e. Taille de l'échantillon : 138 sujets et clichés radiographiques
f. Nombre de séquences : 32 séquences masculines, 31 séquences féminines
g. Intervalles des séquences : chaque semestre, depuis la naissance jusqu'aux 16 ans (pour les deux sexes)
h. Commentaires sur séquences : Non

(4) LES CORRELATIONS DE L'AGE OSSEUX

Rappelons ce qui a été mentionné bien avant (voir chapitre I : « les développements embryonnaire et maturatif du squelette osseux appendiculaire »). Il y a **trois grands facteurs** intervenant dans la maturation osseuse :

- **Les facteurs génétiques** (l'hérédité) ;
- **Les facteurs intrinsèques** (les hormones) ;
- **Les facteurs extrinsèques** (l'alimentation, l'activité physique, la corpulence, les facteurs socio-économiques).

Dans le cadre de l'analyse de la maturation squelettique évaluée par la méthode de Sempé, notre étude tente à chercher des liens de relation qui peuvent exister entre la maturation squelettique d'une part et quelques facteurs extrinsèques qui l'influencent d'autre part, notamment la corpulence (IMC) et le SSE.

Les lignes qui suivent, aborderont les rapports éventuels des âges osseux estimés par le Maturos, avec deux paramètres, l'un de la croissance staturo-pondérale de l'échantillon qui est l'indice de masse corporelle, et l'autre apparenté à la croissance qui est le statut socio-économique.

A. L'indice de masse corporelle et sa corrélation avec l'âge osseux :

L'indice de masse corporelle, ou IMC, est un indicateur de la croissance pondérale tenant compte de la taille, il varie chez l'enfant avec l'âge et le sexe, et il est calculé par la formule : Poids (kg) / Taille^2 (m^2).

Cet indice (1) reflète la masse grasse corporelle, et sur laquelle il (2) permet de classer les sujets dans trois catégories (insuffisance pondérale, état pondéral normal, surpoids ou obésité), mais aussi (3) il prévoit cet état de la masse grasse dans les quelques mois qui viennent.

L'IMC fait partie d'un ensemble auxologique (taille, poids et IMC) constitué au moins de deux mesures somatiques, dont il est recommandable d'inclure ces données anthropométriques dans les études qui traitent la maturation squelettique. La donnée essentielle qu'il faut absolument apparier aux radiographies est l'indice de masse corporelle pour analyser l'influence possible sur la vitesse de maturation [59, 137].

Notre étude va faire correspondre l'IMC à l'AO afin de dégager un lien de corrélation intéressant à l'apprécier.

Dans le chapitre « Résultats », la relation IMC et AO est démontrée sur les tableaux 97-103, et sur les figures 186-192.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) Concernant les statistiques générales de l'IMC : (Tab. 97 et 98 ; Fig. 186 et 187)

La moyenne de l'IMC vaut 18,116, avec un petit ET de 2,658.

La moyenne de l'IMC chez les garçons (18,331) dépasse sensiblement celle des filles (17,907).

On remarque que les valeurs de la moyenne (18,11) et de la médiane (18,10) sont presque les mêmes, ajoutées à l'ET qui est petit, et aux coefficients de l'asymétrie et de Kurtosis qui sont supérieurs à zéro : tous ces indices confirment l'aspect normal, serré et un peu étalé à droite de la distribution des IMC de l'échantillon.

A l'inverse de notre étude, Chaumoître et coll. (2007) dans leur étude sur l'âge osseux, l'IMC et le SSE, notent une différence significative entre la corpulence des garçons (17,3) et celle des filles (18,6), en faveur des filles. L'auteur a expliqué ce décalage de corpulence éventuellement par la maturation plus avancée des filles par rapport aux garçons.

(2) Concernant les catégories de l'IMC : (Tab. 99 et 100 ; Fig. 188-190)

Afin de rentabiliser les valeurs de l'IMC en les rattachant aux âges osseux, nous avons procédé à un classement des sujets, sur la base de ces valeurs et de leur signification par rapport à la masse grasse corporelle, en trois classes : Maigre (n = 7), Normal (n = 105) et Obèse (n = 26), la plupart des sujets de l'échantillon sont des sujets normaux.

Le calcul de la moyenne IMC de l'échantillon par catégories d'IMC, trouve des valeurs qui augmentent progressivement avec un certain ordre des catégories IMC : Maigre (13,900), Normal (17,710) et Obèse (20,892). Cet ordre qui accompagne l'augmentation progressive de la moyenne, nous renseigne sur l'itinéraire de la corpulence.

(3) Concernant la moyenne de la différence AO-AC par catégorie IMC : (Tab. 101 ; Fig. 191 et 192)

Le calcul de la moyenne de la différence AO-AC pour chaque catégorie d'IMC nous renseigne sur un certain itinéraire de la maturation squelettique par rapport aux catégories IMC : quand on passe d'une catégorie à une autre, la vitesse de la maturation change.

Autrement dit, chaque fois que l'IMC augmente, depuis la catégorie « Maigre » à la catégorie « Normal », ou de cette dernière à la catégorie « Obèse », la différence AO-AC « s'améliore », c'est-à-dire l'AO devient de plus en plus avancé par rapport à l'AC, et les chiffres des moyennes donnent preuve : Maigre (- 8,71), Normal (- 0,4) et Obèse (4,85).

Donc, (1) plus l'IMC est faible, plus la maturation se ralentit, (2) plus l'IMC du sujet est normal, les valeurs des AO et AC s'égalisent et (3) plus le sujet a tendance vers le surpoids, plus la vitesse de la maturation s'accélère.

Il y a alors, dès maintenant, une éventuelle corrélation entre l'IMC et l'AO, puisque le degré de maturation varie dans le même sens que la corpulence, et trois aspects peuvent être dégagés :

- Un retard de maturation chez les enfants « Maigres » plus marqué que chez les enfants «Normaux» ;
- Une avance de maturation chez les enfants «Obèses» ;
- Les sujets «Normaux» ont un AO proche de leur AC.

Comme dans notre étude, Chaumoître et coll. (2007), en suivant les valeurs de la différence AO-AC, ils ont constaté une évolution progressive allant d'un retard de maturation chez les enfants maigres à une avance de maturation chez les enfants en surpoids. Les auteurs ramènent les mêmes conclusions que les nôtres, ils marquent l'existence d'une relation nette entre la corpulence et la maturation osseuse, quel que soit le sexe, en insistant sur l'influence de la corpulence sur la différence AO-AC. Ils ont constaté que les enfants en insuffisance pondérale ont un retard de maturation (- 1,605), et à l'opposé, les enfants obèses (IMC élevé) ont une avance de maturation (0,59).

(4) <u>Concernant la corrélation entre la moyenne AO-AC et les catégories IMC</u> : (Tab. 102 et 103)

La corrélation entre la moyenne de la différence AO-AC et les trois catégories de l'IMC des enfants et des adolescents de l'échantillon doit être vérifié statistiquement par le coefficient de corrélation qui doit être proche de 1, adjugé par la p value qui doit être inférieure à 0,05.

Le coefficient de corrélation est $r = 0,380$ marquant une corrélation moyenne et positive, et le $p < 0,001$ marquant un niveau élevé de significativité de cette corrélation.

Il existe alors une relation significative entre la différence AO-AC et les catégories IMC, sous forme d'une corrélation moyenne et positive.

Par ailleurs, la corrélation AO-AC et IMC est aussi vérifiable par un autre test, dit d'ANOVA, afin de chercher la relation d'indépendance entre ces deux variables.

Statistiquement parlant, il existe une relation ($F = 11,904$) significative ($p < 0,001$) entre la différence AO-AC et les catégories IMC.

On assiste alors, à un double lien qui relie l'AO à l'IMC : un lien de corrélation positive et un lien de dépendance.

Chaumoître et coll. (2007) dans leur étude, confirme l'existence d'une corrélation considérable entre AO et IMC ($r = 0,6$) un peu plus élevé que celui de notre étude.

De leur part, Chaumoître et coll. (2007) s'argumentent en avançant plusieurs études qui ont arrivé aux mêmes conclusions :

- Benso et al. (1997), ont mis en évidence une corrélation entre vitesse de maturation et IMC élevé ;
- Aicardi et al. (2000), sur un échantillon restreint, ont montré que la maturation augmentait quand l'IMC augmentait sans différencier clairement les filles des garçons ;
- Russell et al. (2001), ont justifié l'avance de maturation des afro-américains par rapport aux américains de type « caucasien » par leur IMC plus élevé ;
- Wang (2002), dans son étude portant sur 3000 enfants américains, retrouvait le lien entre la corpulence et la maturation osseuse ; chez les filles le surpoids entraînait une maturation avancée ;
- Lewis et al. (2002), dans son étude sur 139 enfants d'Afrique sub-saharienne trouve que les jeunes filles obèses ont une avance de maturation, et que les enfants présentant un IMC bas ont un retard de maturation ;
- De Peretti (2004), note que l'obésité, dans un pays développé comme la France, est fortement liée au niveau socio-économique avec une prévalence élevée de l'obésité dans les couches sociales défavorisées.

B. Le statut socio-économique et sa corrélation avec l'âge osseux :

Le statut socio-économique, ou SSE, est un paramètre qui résume la situation sociale et économique de (la famille de) l'enfant et de l'adolescent, il agit directement ou indirectement sur la croissance et la maturation de l'enfant.

Le SSE est un paramètre à plusieurs aspects : environnement, famille, habitat, revenu et santé.

Le niveau socio-économique est un paramètre primordial dans le parcours de l'évolution de la maturation squelettique, mieux que d'autres paramètres ou facteurs utilisés quelquefois pour expliquer le processus de maturation. En effet, en pratique médico-légale, il est très délicat de prendre en compte l'ethnicité dans l'estimation de l'âge mais il faut souligner que c'est le niveau socio-économique qui a le plus d'influence [38]. D'ailleurs, Schmeling a déjà démontré que l'origine ethnique ne joue pas de rôle dans la maturation squelettique, contrairement aux conditions socio-économiques auxquelles le sujet est soumis [47], et l'application des normes radiographiques à une personne dont le SSE est inférieur à celui de la population de référence conduit généralement à une sous-estimation de l'âge de cette personne [67, 130].

Afin d'aborder ce paramètre, l'échantillon a été classé en trois groupes selon le niveau socio-économique des enfants et des adolescents. Ces GSE sont distingués

en « Favorisé », « Moyennement favorisé » et « Défavorisé ». Malheureusement, le groupe « dF » n'était pas représenté dans l'échantillon, et ce dernier était particulièrement composé de sujets à SSE moyen à aisé. Par conséquent, et à cause de ce manque, nous avons assisté à des calculs statistiques moyennement représentatifs.

Dans le chapitre « Résultats », la relation SSE et AO est démontrée sur les tableaux 104-107, et sur les figures 193-196.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) Concernant la répartition de la population par rapport aux groupes socio-économiques (GSE) : (Tab. 104 ; Fig. 193 et 194)

Sur la base du niveau socio-économique, notre échantillon est distingué en deux GSE, le « F » qui forme la grande partie de l'échantillon (n = 125) et le « mF » (n = 13). Le troisième groupe, le « dF », manque pour les raisons déjà citées.

(2) Concernant la moyenne de la différence AO-AC par GSE : (Tab. 105 ; Fig. 195-196)

La moyenne de la différence AO-AC est différente d'un GSE à l'autre, avec une moyenne faible et positive du groupe « F » (0,66 mois) et une moyenne négative du groupe « mF » (- 4,54 mois).

Cette différence est évidemment significative par rapport aux statuts de chaque groupe, c'est-à-dire quand on change de groupe SE, la différence AO-AC change : le passage du groupe « F » au groupe « mF » s'accorde avec un ralentissement de la vitesse de la maturation squelettique, ce qui explique l'avance de l'AC par rapport à l'AO chez les sujets « mF ».

Pour Chaumoître et coll. (2007), les individus concernés par des procédures de justice pour lesquels une estimation d'âge est demandée sont en grande majorité issus de niveau socio-économique défavorisé et donc ils ont le plus souvent un retard de maturation avec un AO inférieur à leur AC [différence AO-AC négative] ce qui leur sera juridiquement profitable.

La même équipe, Chaumoître et coll., déclare que la maturation est liée au niveau socio-économique et à la qualité du système de santé comme le souligne une méta-analyse récente de la littérature, et ils trouvent une action visible du niveau socio-économique à l'échelon populationnel dans leur étude, où la maturation des individus favorisés (- 0,29) est supérieure à celle des individus défavorisés (- 0,75). Ce qui s'accorde avec les résultats de notre étude.

(3) Concernant la corrélation entre la moyenne AO-AC et les groupes SSE : (Tab. 106-107)

La corrélation entre la moyenne de la différence AO-AC et les GSE des enfants et des adolescents de l'échantillon est prouvée statistiquement par la valeur du coefficient de corrélation (r).

Nous avons trouvé une relative corrélation négative entre la différence AO-AC et les GSE de l'échantillon (r = - 0,203). Cette relative corrélation est adjugée par la valeur p = 0,017 (doit être < 0,05), qui indique la significativité de cette corrélation.

Il existe alors une relation significative entre la différence AO-AC et les GSE, sous forme d'une corrélation relative et négative, autrement dit, si on passe d'un SSE favorisé à un SSE moyennement favorisé, la différence AO-AC se négative, ce qui va nous faire penser que s'il y avait un groupe « dF », la différence AO-AC serait plus négative.

Pour bien confirmer cette corrélation, on utilise le test ANOVA, qui donne une valeur F = 5,849 avec un niveau de signification p < 0,017.

Ces valeurs seront interprétées par l'existence d'une relation significative entre ces deux variables, avec un impact du SSE sur l'AO.

Il existe alors une relation significative entre la différence AO-AC et les groupes SSE, où l'AO est influencé par le SSE.

Pour Serin (2014), un niveau socio-économique bas, peut ralentir la vitesse de la maturation squelettique.

Le rapport de l'EASO (European Asylum Support Office) sur la détermination de l'âge en Europe (décembre 2013) affirme que lorsque la nutrition est considérablement réduite, la maturation est ralentie. Cela signifie que l'âge du squelette pourrait sembler plus jeune, entraînant une sous-estimation de l'âge.

Pour Saint-martin (2014), il s'avère que 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, ainsi que le niveau de modernisation de la population dont il est issu. Un mauvais niveau socio-économique ralentit la vitesse de la maturation osseuse. 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, ses droits fondamentaux en tant que mineur n'étant pas respectés.

C. La corrélation entre l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique :

Le lien entre la corpulence et le niveau socio-économique, met en lumière l'intrication et le caractère multiple des facteurs influençant la maturation osseuse qui peuvent agir en synergie : le niveau socio-économique et la corpulence favorisent la maturation et concernent le même type de population [38].

Dans le chapitre « Résultats », la relation IMC et SSE est démontrée sur les tableaux 108-111, et sur les figures 197 et 198.

Plusieurs remarques à révéler :

(1) Concernant la répartition de l'effectif par rapport aux catégories IMC et aux groupes SE : (Tab. 108 ; Fig. 197 et 198)

Sur un tableau « croisé » comme celui qui est exposé dans « Résultats », nous pouvons déduire quelques remarques :

- Les « maigres » n'existent pas (n = 0) parmi le groupe « F » ;
- Les « F » sont soit des « normaux » (n = 101), soit des « obèses » (n = 24) ;
- Les trois catégories (maigre, normal, et obèse) peuvent être « mF », avec un décalage de nombre peu différent : les maigres ont le plus de nombre (n = 7), puis les normaux (n = 4) et enfin les obèses (n = 2).

(2) Concernant la corrélation entre les catégories IMC et les groupes SE : (Tab. 109-111)

La corrélation entre ces deux variables qualitatives, les groupes SE et les catégories IMC, est calculable statistiquement. Le coefficient de corrélation ($r = - 0,322$) est relatif et négatif, avec un niveau élevé de significativité ($p < 0,001$). C'est-à-dire, quand on passe de « F » au « mF », le nombre des « normaux » diminue, et celui des « obèses » diminue aussi.

Marquant, la non représentation de la catégorie des « maigres » parce qu'elle n'existe que chez les « mF », autrement dit, si nous avions une catégorie « dF » nous aurions eu l'occasion de voir la courbe des « maigres ».

Pour plus de confirmation, la relation entre les groupes SEE et les catégories IMC est identifiée par un test statistique qui vérifie la relation d'indépendance ou d'influence entre deux variables qualitatives, c'est le test Khi deux qui revient significatif. Enfin, en appliquant un troisième test qui vérifie la force de cette relation, c'est l'indice de Cramer, qui donne une force significative à cette relation.

La corrélation entre l'IMC et le SSE est significative et forte.

L'étude Chaumoître et coll. (2007) confirme le lien net qui est visiblement proportionnel entre la corpulence et le niveau socio-économique : l'augmentation de la corpulence se voit avec l'augmentation du niveau socio-

économique. Les auteurs trouvent aussi qu'au Maroc, et contrairement aux pays développés, le surpoids est associé à un SSE Favorisé. La maturation osseuse est liée à l'IMC et au niveau socio-économique.

CONCLUSION

CONCLUSION

Notre étude est prospective, transversale et analytique, elle s'est basée sur un échantillon de 138 enfants et adolescents, des deux sexes, sains, dont on connaît l'âge civil, qui habitent la wilaya d'Annaba et qui appartiennent à des familles à statut socio-économique moyen et aisé.

L'étude nous a permet d'évaluer le taux de maturation squelettique et d'estimer l'âge osseux correspondant, de tester l'applicabilité de la méthode de Sempé, de tracer le schéma d'ossification qui permet le suivi de l'évolution de la maturation osseuse, de rechercher des indicateurs osseux en rapport avec le déclenchement de la puberté, d'éditer un Atlas de maturation préliminaire et de vérifier la corrélation de l'âge osseux avec l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique.

L'évaluation de la maturation osseuse n'est qu'un élément, certes important, de développement de l'enfant qu'il faut l'intégrer dans un contexte clinique et biologique plus complet.

L'essence et l'essentiel de notre étude se résume dans trois grandes conclusions et dans trois recommandations.

La première conclusion :

La méthode du Professeur Michel SEMPÉ dédiée à l'évaluation de la maturation squelettique est fiable pour l'appliquer sur la population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens.

En effet, tous les résultats de notre étude ont confirmé cette conclusion, qu'ils soient les données ou les analyses statistiques, et l'estimation de l'âge osseux par cette méthode à l'échelle populationnelle et même individuelle était très bonne, démontrée par le nombre important de calculs et par les comparaisons.

Les moyennes des âges civils et osseux sont très rapprochées, la moyenne de la différence de l'âge osseux et de l'âge civil est très faible et la corrélation entre l'âge civil et l'âge osseux est significativement très forte et positive.

La variabilité de la lecture de l'âge osseux est un autre critère qui vérifie la fiabilité de la méthode de Sempé. La répétabilité et la reproductibilité de la lecture de l'âge osseux par la méthode de Sempé, ont été prouvée par les valeurs très rapprochées des moyennes des anciens et des nouveaux âges osseux des lectures et re-lectures, la corrélation était significativement trop forte et positive entre les âges osseux des lectures, ce qui atteste la précision de la méthode de Sempé utilisée pour évaluer les âges osseux des enfants et des adolescents de l'échantillon.

Le temps de lecture de l'âge osseux, autre critère de fiabilité de la méthode de Sempé, était court, ce qui désigne la simplicité de la manipulation et la facilité d'apprentissage, qui sont deux éléments importants dans l'applicabilité de la méthode et dans les « options » d'utilisation d'une méthode donnée, bien que l'âge osseux n'ait été jamais

un acte « d'urgence » pour insister sur le temps de lecture. Ce qui compte dans l'évaluation de l'âge osseux est la précision et l'objectivité de la méthode qui nécessitent un temps variable selon les détails et les particularités rencontrées sur les clichés radiographiques.

Au total, la correspondance est réelle et significative entre l'âge civil de notre échantillon (les enfants et les adolescents algériens) et l'âge osseux calculé par la méthode de Sempé, selon les standards adoptés de sa population (les enfants et les adolescents français).

Par conséquent, la fiabilité de la méthode de Sempé, ainsi vérifiée et confirmée, va mettre l'accent sur deux points :

- **La validité du Logiciel Maturos®4.0 et de ses standards définis par la méthode de Sempé :**

  Le Maturos est la dernière version informatisée de la méthode de Sempé, et sur lequel notre étude est basée pour estimer le pourcentage de la maturation squelettique et déduire l'âge osseux de chaque enfant et adolescent.

  Pratiquement parlant, en se basant sur notre expérience avec le Maturos en le manipulant pour évaluer la maturation osseuse de tout l'échantillon, nous pouvons affirmer que cet outil informatique a permis d'automatiser la méthode de Sempé en la rendant plus facilement accessible, rapide et précise, et aussi de raccourcir la durée des calculs et par conséquent des résultats.

- **La validité de la méthode de Sempé vis-à-vis les variabilités individuelles :**

  La méthode de Sempé a prouvé sa fiabilité pour notre population, malgré les différences qui se manifesteraient au sein d'une même classe d'âge, entre notre population et celle de la méthode de Sempé, qui sont en rapport avec les éventuelles influences de la race, de l'état nutritionnel, des facteurs socio-économiques et des évolutions séculaires qui peuvent exister entre les individus, les populations et les générations. Le Logiciel Maturos a aujourd'hui 36 ans d'existence, depuis sa première édition (1988), le « MATUROS 1.0 », en passant par sa dernière édition corrigée et évoluée (2001), le « MATUROS 4.0 CD », et puisque la méthode de Sempé a prouvé son applicabilité pour notre population, elle va par conséquent, être étiquetée par une « indépendance relative » vis-à-vis les éventuelles influences sus-citées.

La deuxième conclusion :

La maturation squelettique est un processus biologique qui suit une évolution chronologique, cumulative, constructive et constante.

Pendant toute la période de l'enfance et de l'adolescence jusqu'à l'âge adulte, la maturation squelettique va suivre une évolution à la fois chronologique (les indicateurs osseux apparaissent et évoluent selon un ordre et des dates), cumulative (le substrat osseux s'ajoute à l'intérieur des maquettes cartilagineuses et le taux de maturation augmente, année après année), constructive (l'ossification permet de

construire l'ossature de la région poignet-main, pièce par pièce) et constante (l'évolution est fixe sur trois plans : vitesse, ordre et taux de maturation).
Notre étude a pu tracer un « schéma d'ossification » qui nous a permis, après sa superposition aux données de Sempé, de « découvrir » les quatre propriétés, sus-citées, de la maturation squelettique.
Cette richesse ne va pas s'arrêter là, le schéma de l'évolution de la maturation osseuse nous a permis aussi :

- de voir les trajets multidirectionnels de la maturation ;
- de confirmer le décalage de maturation en faveur des filles par rapport aux garçons ;
- de mettre le doigt sur trois critères osseux radiologiques qui coïncideraient au déclenchement de la puberté ;
- d'éditer un « Atlas » préliminaire, anatomo-radiologique de la maturation squelettique.

La troisième conclusion :

Les interrelations significatives entre la maturation squelettique, l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique.

Ces interrelations sont significatives au point où nous pourrions « prévoir » l'état de la maturation de l'enfant ou de l'adolescent, en se basant sur l'indice de masse corporelle, reporté sur la courbe de corpulence, et le statut socio-économique.

- **La relation qui unit la maturation squelettique avec l'indice de masse corporelle (IMC) et par conséquent les deux paramètres de la croissance, la taille et le poids, est significativement forte.**

  En effet, quand on passe de la catégorie des « Maigres » aux « Normaux », ou celle de la catégorie des « Normaux » aux « Obèses », la maturation accélère. Il y a alors une relation entre l'IMC et l'âge osseux, puisque le degré de maturation varie dans le même sens que la corpulence, ce qui va nous permettre de dégager trois aspects globaux : un retard de maturation chez les sujets « Maigres » plus marqué que chez les «Normaux», un âge osseux proche de l'âge civil pour les sujets «Normaux», et une avance de maturation chez les sujets «Obèses» plus marqué que chez les «Normaux». Un IMC élevé alors, est associé à une avance de maturation, et un IMC bas est associé à un retard de maturation.

  La corrélation de la différence des âges osseux et civils et les catégories d'IMC est significativement bonne et positive, et l'âge osseux est dépendant de l'IMC. On assiste alors, à un double lien qui relie l'âge osseux à l'IMC : un lien de corrélation positive et un lien de dépendance.

- **La relation qui unit la maturation squelettique avec le statut socio-économique (SSE) est relativement forte.**

  Nous avons remarqué que le passage du groupe « favorisé » au groupe « moyennement favorisé » s'accorde avec un ralentissement de la maturation squelettique.

  La corrélation de la différence des âges osseux et civils et les groupes socio-économiques est significativement relative et négative, où l'âge osseux est influencé par le statut socio-économique.
- **La relation qui unit l'indice de masse corporelle avec le statut socio-économique est relativement forte.**

  La corrélation entre l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique est significative, relativement forte et négative, quand on passe de « favorisé » au « moyennement favorisé », le nombre des « normaux » diminue, et celui des « obèses » diminue aussi. La corpulence augmente de façon proportionnelle avec le niveau socio-économique, et le surpoids est associé à un SSE Favorisé.

Les recommandations :

De cette étude se découlent trois principales recommandations, qui viennent compléter la conclusion :

(1) Notre étude conclut que l'approche qui a été proposée pour pallier la problématique est une étude d'évaluation de la maturation squelettique basée sur une méthode valide et efficace, celle de Sempé, mais qu'il faut effectuer des études à plus grande échelle, à plus grand nombre de sujets, pour tester la validité de la méthode. La multiplication de travaux algériens basés sur la méthode de Sempé permettra de constituer des données de référence nationales, permettant une comparaison avec les clichés radiographiques obtenues sur un enfant ou un adolescent 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 » [126] ;

(2) L'évaluation de la maturation squelettique basée sur la région du poignet et de la main gauche nécessite dans certaines situations particulières (période pubertaire, « âges charnières » de la juridiction, etc…), d'être affinée par d'autres « examens osseux » comme la TDM de la clavicule, le Risser de la crête iliaque et la radiographie du coude, face et profil, pendant la période pubertaire, méthode sur laquelle insiste le Professeur Sempé ;

(3) La radiographie numérique est devenue un outil incontournable pour une lecture soigneuse de la maturation squelettique, il est souhaitable qu'elle soit exigée pour chaque demande d'âge osseux.

A la fin de cette Conclusion, nous souscrivons à l'opinion exprimée par Jacques PONTIER, Professeur de mathématique, Université Claude BERNARD-Lyon I, et membre de l'équipe qui a édité le Logiciel Maturos. Pontier a écrit : *« Encore faut-il disposer d'une méthode établissant ce degré de maturation squelettique de manière précise et fiable, laissant le moins de place possible à l'inévitable subjectivité qu'entraîne toute appréciation visuelle de la forme d'une image : la méthode présentée par Michel SEMPÉ est actuellement là pour tenir parfaitement ce rôle. Nous pensons donc que, même perfectible, cette méthode devrait, pendant longtemps, faire autorité en matière d'évaluation de la maturation squelettique, aussi bien dans les études fondamentales d'auxologie, que dans les applications pratiques médicales, pédiatriques »* [137].

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Contiennent : des ouvrages, des thèses, des mémoires, des lois, des rapports, des articles dans des périodiques, des articles sur sites web, des abstracts et des documents que m'a offerts le Professeur Michel SEMPÉ)

A

1. ADALIAN P. Evaluation multiparamétrique de la croissance fœtale : Applications à la détermination de l'âge et du sexe. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de la méditerranée. Université de la méditerranée – Aix-Marseille II - Faculté de Médecine de Marseille, décembre 2001
2. ADAMSBAUM C., AÏT AMEUR A., BENOSMAN S.M., ANDRE C., KALIFA G. Âge osseux et diagnostic des troubles de la croissance. Encycl Méd Chir (Editions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS, Paris, tous droits réservés), Radiodiagnostic - Squelette normal, 30-480-A-20, 2002, 8 p
3. ADAMSBAUM C., CHAUMOITRE K., PANUEL M. La détermination de l'âge osseux à des fins médico-légales, que faire ?. J Radiol 2008 ; 89 : 455-6
4. ADAMSBAUM C., FALIP C., MILLISCHER BELLAÏCHE V., KALIFA G. Age osseux, intérêt et limites : stratégie diagnostique devant une anomalie de la croissance. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Radiodiagnostic - Squelette normal - Neuroradiologie - Appareil locomoteur, 30-480-A-20, 2008 : 1-9

4 bis. AGOSSOU-VOYEME A. K., FACHEHOUN C. R., BOCO V. HOUNNOU G. M., BIAOU O. Âge osseux du noir béninois : À propos de 600 enfants âgés de 9 à 18 ans et résidant à Cotonou. Morphologie, Volume 89, Issue 285, June 2005, Pages 64-70. Masson, Paris, 2005

5. ALLAL A. Impact du mariage précoce sur la législation et la société. Revue méditerranéenne de droit et d'économie. Volume 3, Numéro 1, Pages 01-23. 2018-06-10
6. ALSHAMRANI K., OFFIAH A. C. Applicability of two commonly used bone age assessment methods to twenty-first century UK children. European Radiology (2020) 30:504–513. https://doi.org/10.1007/s00330-019-06300-x
7. AMSELEM S., CAREL J-C., DE ROUX N., ISSAD T., MACCARI S., PREVOT V., SUSANNE C. Croissance et puberté : évolutions séculaires, facteurs environnementaux et génétiques. [Rapport de recherche] Institut national de la santé et de la recherche médicale(INSERM). 2007, 176 p., cartes, graphiques, références bibliographiques disséminées. ffhal-01570647
8. Analyse Données : Spécialiste en analyse d'enquêtes et traitement de questionnaires. 2024. Traitement et analyse de données d'enquêtes de satisfaction (analyse-donnees.fr)
9. APOLITO P. Un avenir ouvert. Le courrier UNESCO. 38ème année, 1985 ; 23-26

10. APPAJI A. C., KULKARNI R. Surface and Radiological Anatomy, with a Clinical Perspective. Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, The Health Sciences Publisher, 2017. PP 117-29
11. Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2023. Rapport de l'ASN 2023

B

12. BAH O. A., DJANIKPO O., MESRAR J., BALDE A. A., ADJENOU V. K., BEN SALEM D. Estimation de l'âge osseux en IRM en vue d'une sélection « FIFA U-17 ». Journal de Radiologie Diagnostique et Interventionnelle (2017) 98, 247-250
13. BAI J. C., et coll. Maladie Cœliaque. World Gastroenterology Organisation Global Guidelines. Juillet 2016
14. BAUDHUIN P. NUZZO V. ZIMMERMANN N. Radiologie numérique : Le numérique devient conventionnel ! J Radiol 2004;85:1037-45 © Éditions Françaises de Radiologie, Paris, 2004
15. BERTIEAUX F. Conséquences du non-enregistrement des naissances sur les droits des femmes et des filles, Projet de rapport. Réunion du Réseau des femmes parlementaires Hanoi (Vietnam) – 26-28 février 2019
16. BINDER M. L'enfant et le sport. Journal de Pédiatrie et de Puériculture n°2 - 2001 ; 14 : 82-88
17. BODART P. De la radiologie d'hier (1950) à l'imagerie médicale d'aujourd'hui, UCL : le rayon du souvenir. Bruxelles, juin 2001. https://sites.uclouvain.be/md-histoire/livre/imag.pdf
18. BONITA R., BEAGLEHOLE R., KJELLSTRÖM T. Eléments d'épidémiologie. Organisation mondiale de la Santé. 2ème édition, 2010
19. BONNEL F. CHEVREL J. P., OUTREQUIN G. Anatomie Clinique. Les Membres. Edition Springer-Verlag France, 1991. P : 3-6, 37-42, 101-104, 161-167, 221-228, 339-344, 397-402, 463-468, 509-515
20. BONNEL F., ROUSSANNE Y., CHEMOUNY S., BANEGAS F. Modélisation du carpe osseux et biomécanique. Chirurgie de la main 26 (2007) 180-199
21. BONNET COGULET F. Rapport DEI 2005-2006, Chapitre 4.3 : Les mineurs étrangers isolés. http://www.dei-france.org/rapports/2005-2006/Chap_4.3_Mineurs_Etrangers_Isol%C3%A9s.pdf
22. BONTRAGER K. L., LAMPIGNANO J. P. Positions et incidences en radiologie conventionnelle, Guide pratique. (Édition française : Bléry M.). Elsevier Masson SAS, 2011
23. BOUCHARD M. La maturation osseuse : comment l'apprécier au quotidien?. mtp (médecine thérapeutique pédiatrie), vol. 9, n° 4, juillet-août 2006 : 213-219
24. BOUCHARD M., Sempé M. « MATUROS 4.0 » CD : un nouvel outil d'évaluation de la maturation squelettique. Biom. Hum. et Anthropol. 2001, 19, 1-2 : 9-12

25. BOUCHET A., CUILLERET J. Anatomie topographique, descriptive et fonctionnelle. 3a le membre supérieur. 3ème édition, Simep/Masson 1995. P : 1157-1172, 1239-1250, 1317-1332, 1353-1372
26. BOUCHET A., CUILLERET J. Anatomie topographique, descriptive et fonctionnelle. 3 le membre supérieur, le membre inférieur. Edition Simep 1983. P : 1453-1473, 1551-1570, 1625-1636, 1654-1673
27. BOUHOURS-NOUET N., DONZEAU A., COUTANT R. Conduite pratique devant une anomalie de la croissance. EMC - Pédiatrie 2015 ; 10 (4):1-22 [Article 4-005-A-10]
28. BOURRILLON A. Pédiatrie pour le praticien. 5ème édition (2008). Elsevier Masson
29. BRAUDEL F. Mère méditerranée. Le courrier UNESCO. 38ème année, 1985 ; 4-12
30. BRAUNER R. Puberté pathologique. EMC (Elsevier SAS, Paris), Pédiatrie, 4-107-B-15, 2006

C

31. CALFEE R. P., SUTTER M., STEFFEN J. A., GOLDFARB C. A. Skeletal and chronological ages in American adolescents: current findings in skeletal maturation. J Child Orthop (2010) 4:467–470. DOI 10.1007/s11832-010-0289-z
32. CANOVAS F., JAEGER M., DIMEGLIO A., BONNEL F., SULTAN C. L'évaluation de la maturation des os du carpe par analyse d'image : une alternative à l'âge osseux ou un outil complémentaire?. Arch Pédiatr 2000 ; 7 : 976-81
33. CHAUMOITRE K. Utilisation médico-légale de l'âge osseux : quelle méthode, quelle fiabilité ?. E-Quotidien des JFR, 2017. https://ebulletin.radiologie.fr/samedi/utilisation-medico-legale-lage-osseux-quelle-methode-quelle-fiabilite
34. CHAUMOITRE K., ADALIAN P., COLAVOLPE N., RAMIS O., MARCIANO S., LEONETTI G., BOETSCH G., PANUEL M. Quelle valeur accorder à l'os sésamoïde du pouce dans la détermination de l'âge osseux ?. J Radiol 2008 ; 89 : 1921-4
35. CHAUMOITRE K., COLAVOLPE N., MARCIANO-CHAUGNAUD S., DUTOUR O., BOETSCH G., LEONETTI G., PANUEL M. LEG-WS-2 Utilisation de l'atlas de Greulich et Pyle dans un but médico-légal : pertinence et limites. Journal de Radiologie, Volume 88, Issue 10, October 2007, Page 1544
36. CHAUMOITRE K., COLAVOLPE N., SAYEGH-MARTIN Y., PERNOUD N., DUTOUR O., PANUEL M. Fiabilité de la détermination de l'âge osseux par la méthode de Sauvegrain et Nahum. J Radiol 2006 ; 87 : 1679-82
37. CHAUMOITRE K., LAMTALI S., BAALI A., DUTOUR O., BOETSCH G., GAREL L., PANUEL M. Estimation de l'âge osseux par l'atlas de Greulich et Pyle : comparaison de trois échantillons contemporains d'origine géographique différente. J. Radiol 2007; 88: 1376

38. CHAUMOITRE K., LAMTALI S., ESSADKI B., LAHMAN A., BAALI A., BOETSCH G., PANUEL M. Influences du statut socio-économique et de l'incidence de masse corporelle sur l'âge osseux, Etude sur une population pédiatrique marocaine. Journal de Radiologie, Volume 88, Issue 10, October 2007, Page 1596. https://doi.org/10.1016/S0221-0363(07)81981-0. http://pe.sfrnet.org/Data/ModuleConsultationPoster/pdf/2007/1/ab2c7558-af0c-4a60-8b92-062ffffd50fb.pdf
39. CHAUSSAIN J.-L., CHAPUIS Y. La fiabilité des examens médicaux visant à déterminer l'âge à des fins judiciaires et la possibilité d'amélioration en la matière pour les mineurs étrangers isolés. Bull. Acad. Natle Méd., 2007, 191, no 1, 139-42, séance du 16 janvier 2007
40. CAVALLO F., MOHN A., CHIARELLI F., GIANNINI C. Evaluation of Bone Age in Children: A Mini-Review. Front. Pediatr. (2021) 9:580314. doi: 10.3389/fped.2021.580314
41. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL). Corpulence. CORPULENCE : Définition de CORPULENCE (cnrtl.fr)
42. COLAVOLPE N., CHAUMOITRE K., KBAIER P., DUTOUR O., CHAUDET H., PANUEL M. Variabilité de la maturation osseuse du poignet en Période pré et per pubertaire : Comparaison des méthodes d'évaluation. Journal de Radiologie, Volume 86, Issue 10, October 2005, Page 1564. https://doi.org/10.1016/S0221-0363(05)76309-5 http://congres.jfradio.cyim.com/data/moduleposterelectronique/PDF/2005/d2ed04f4-0a78-4cfd-ab88-339ba01a82e6.pdf [11]
43. Corporation de Recherche et d'Action sur les Maladies Héréditaires (CORAMH). Génétique et Hérédité. Génétique et hérédité – CORAMH
44. COSQUER C., BRUN S. Race et Ethnie : quelques clarifications. Extraites d'un ouvrage salutaire sur « Sociologie de la race », « 128 » (2022), p 61-72. Race et ethnie : quelques clarifications - Les mots sont importants (lmsi.net)
45. CRAVIARI T., SEMPE M., CHOTEL F., BOUCHARD M., BERARD J. Évaluation de la maturation squelettique au niveau du coude en orthopédie. Biométrie humaine et anthropologie 19, 13 (2001). https://www.semanticscholar.org/paper/%C3%89valuation-de-la-maturation-squelettique-au-niveau-Craviari-Sempe/af42bf31622c590bda186dbc0241e0b906e239b8

D

46. DE BAZELAIRE C. Radiologie numérique. Radiologie numérique (studylibfr.com)
47. DEDOUIT F. Imagerie en coupe et Anthropobiologie : Applications médico-légales pour la détermination de l'âge. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse : Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), Mai 2009

48. Défense des Enfants-International (DEI), Section Suisse. A propos des méthodes de détermination de l'âge par des tests osseux. Bulletin DEI, décembre 2004 Vol 10 No 3/4 p. 10, 11 http://www.dei.ch/f/article_dei.php5516
49. DEHEEGER M., ROLLAND-CACHERA M. F. Etude longitudinale de la croissance d'enfants parisiens suivis de l'âge de 10 mois à 18 ans. Archives de Pédiatrie II (2004), 1139-1144
50. DELPAS C. FRIJA G. MAZOYER B. L'imagerie médicale. Fondation recherche Médicale FRM, 2002 Imageriemedicale.PDF (usherbrooke.ca)
51. DE ROO T., SCHRÖDER H. J. Pocket atlas of skeletal age. Martinus Nijhoff - Medical Division - The Hague, 1976
52. DESCHAMPS C., MANDELBAUM J., AMEISEN J.-C., GRIMFELD A., KORSIA H., DE ROUFFIGNAC C., ROUX M. Avis n° 88 sur les méthodes de détermination de l'âge à des fins juridiques. Comité Consultatif National d'Ethique pour les Sciences de la Vie et de la Santé : 1-7, 2005
53. DIAMANT-BERGER O. L'entrée des mineurs isolés demandeurs d'asile : la question de l'expertise osseuse. Intervention au Colloque «Quelle protection en Europe pour les mineurs isolés demandeurs d'asile ?» du 27 octobre 2000 organisé par France Terre d'Asile. PROASILE, la revue de France Terre d'Asile : 36-40, 70-72
54. DIAMANT-BERGER O., NAUWELAERS J. Détermination médico-légale de l'âge du sujet jeune. Extrait du dossier « Le mineur étranger en exil » diffusé au XIème colloque de droit des étrangers du Syndicat des Avocats de France (22 mars 2003, Lille). http://www.gisti.org/IMG/pdf/doc_2003_mineurs-age-medico-legale.pdf
55. DIMEGLIO A. La croissance. Société Française d'Orthopédie Pédiatrique : Trente ans de progrès en orthopédie pédiatrique. 2006 : 375-77
56. DJAGNIKPO O., ADIGO A. M. Y., ADAMBOUNOU K., N'DAKENA K., AGODA-KOUSSEMA L., ADJENOU K. Détection de l'âge osseux par l'IRM du poignet du footballeur de moins de 17 ans. Journal Africain d'Imagerie Médicale JAIM, 2016 ; (8), 1
57. DOMINGUEZ E. I. M., LOPEZ C. M., RAMIREZ E. G., JIMENEZ J. C., RUIDIAZ V. C. Existing relationships between the size and shape of the cervical vertebrae with the stages of carpal bone maturation. Part II. Revista Mexicana de Ortodoncia. Vol. 2, No. 1 January-March 2014. pp 24-31. (3) (PDF) Existing relationships between the size and shape of the cervical vertebrae with the stages of carpal bone maturation. Part II (researchgate.net)
58. DURAND S., BOUKRY D., GALAVERNA J. R., MALLET C., SOUPIOS-DAVID H. Mineurs isolés étrangers : l'accès au séjour et à la demande d'asile. Edité par France Terre d'Asile. Décembre 2018
59. DVORAK J., GEORGE J., JUNGE A., HODLER J. Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players. Br J Sports Med 2007 ; 41 : 45–52

E

60. European Asylum Support Office (EASO). Rapport de l'EASO sur la détermination de l'âge en Europe, Décembre 2013. Office des publications de l'Union européenne, 2014

F

61. FAHMY M., CLAVIER F., FIAT M., PILLIARD D., PENNEÇOT G. Appareillage et chirurgie dans les séquelles de purpura fulminans. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine, 56S (2013) 82654145.pdf (core.ac.uk)
62. FARUCH BILFELD M., DEDOUIT F., SOUMAH M., CARTEGNIE S., JOFFRE F., ROUSSEAU H., ROUGE D., TELMON N. Apport de la radiographie du second métacarpien pour la détermination de l'âge osseux. J Radiol 2008 ; 89 : 1930-4
63. FEREMBACH D., SCHWIDETZKY I., STLOUKAL M. Recommandations pour déterminer l'âge et le sexe sur le squelette. In: Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris, XIII° Série, tome 6 fascicule 1, 1979. pp. 7-45. doi : 10.3406/bmsap.1979.1945 http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/bmsap_0037-8984_1979_num_6_1_1945
64. FIFA.com. Coupe du monde U-17 de la FIFA 2015 : L'équité à la force du poignet. 2015 https://fr.fifa.com/u17worldcup/news/l-equite-a-la-force-du-poignet-2711924
65. FIFA World. À la force du poignet. 2009 https://www.fifa.com/fr/tournaments/mens/u17worldcup/nigeria2009/news/force-poignet-1121816
66. FOURNIER K. L'estimation de l'âge des MENA en question : problématique, analyse et recommandations. Plate-forme Mineurs en Exil, Septembre 2017

G

67. GABIOUD F. Des méthodes d'évaluation de l'âge d'un être humain. Thèse de doctorat : Univ. Genève, 2009, no. Méd. 10599. http://archive-ouverte.unige.ch/unige:4663
68. GARCIER J. M. Anatomie radiologique du squelette pédiatrique. 2015. Anatomie radiologique du squelette pédiatrique (studylibfr.com)
69. GARDNER E., DONALD J. G., O'RAHILLY R. Anatomie (Adaptation française de Jean Bossy). Doin Editeurs 1979, Office des Publications Universitaire 1993. P : 12-13, 48, 56, 65, 155, 749
70. GARNIER M., DELAMARE V., DELAMARE J., DELAMARE T. Le Garnier Delamare : dictionnaire des termes de médecine. 24ème édition. Maloine 1997
71. GASKIN C. M., LOWELL KAHN S., BERTOZZI J. C., BUNCH P. M. Skeletal Development of the Hand and Wrist - A Radiographic Atlas and Digital Bone Age Companion. Oxford University Press, 2011

72. GASSENMAIER S., SCHAEFER J. F., NIKOLAOU K., ESSER M., TSIFLIKAS I. Forensic age estimation in living adolescents with CT imaging of the clavicula—impact of low-dose scanning on readers' confidence. European Radiology (2020) 30:6645–6652. https://doi.org/10.1007/s00330-020-07079-y
73. GILSANZ V., RATIB O. Hand Bone Age - A Digital Atlas of Skeletal Maturity. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Second Edition, 2012
74. GUIGUE V., MARTIN A., SCHAAL J-P., Favre R., RIETHMULLER D. Surveillance fœtale, Guide de l'échographie et du Doppler obstétrical. SAURAMPS MEDICAL, 2009
75. GINER S. La dynamique des peuples méditerranéens**.** Le courrier UNESCO. 38ème année, 1985 ; 13-20
76. GUILLET J., GUILLET C., BLANQUET P. Radioisotopic study of bone growth and maturation. 160 cases. 1982 Oct 21 ; 58 (38) : 2199-202. PubMed, Abstract. [Radioisotopic study of bone growth and maturation. 160 cases] - PubMed (nih.gov)

H

77. HACQUEBORD J. H. The Risser Classification : A Classic Tool for the Clinician Treating Adolescent Idiopathic Scoliosis. Clin Orthop Relat Res (2012) 470:2335–2338
78. HAJ SALEM N., DEDOUIT F., MARET D., ADALIAN P., ROUGE D., PIERCECCHI M.D., AISSAOUI A., CHADLY A., NORBERT T. Estimation de l'âge fœtal par étude scannographique des longueurs fémorales et tibiales : comparaison entre les reconstructions en deux et en trois dimensions. La revue de médecine légale (2010) 1, 71-76
79. Haut-Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR). Convention et Protocole relatifs au statut des réfugiés. 1951 et 1967
80. HAZEBROUCQ V. A la recherche de la meilleure méthode possible de détermination radiologique de l'âge osseux à des fins judiciaires : y aurait-il une bonne réponse à une mauvaise question ?. J Radiol 2008 ; 89 : 1895-6
81. HAZEBROUCQ V. La détermination médicolégale de l'âge osseux d'un mineur : intérêt, justification et limites. SRH info/ 2006 - 4ème trimestre : 16-17
82. HOUNGBEDJI A. E. Rapport de stage de fin de formation : Contribution de la numérisation à l'amélioration de la qualité des examens et au rendement du service de radiologie du CNHU-HKM. Université d'Abomey – Calavi (UAC), BENIN. 2013-2014
83. HOUPERT T., REROLLE C., TELMON N., SAINT-MARTIN P. Contribution du scanner de l'extrémité sternale de la clavicule dans l'estimation de l'âge du sujet vivant. La revue de médecine légale (2016) 7, 22-27

I

84. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). L'exposition aux rayonnements ionisants, 2012. L'exposition aux rayonnements ionisants | IRSN
85. IORDAN G., IORDAN A., ULMEANU D. Le taux de croissance des os carpiens. Morphologie, Vol 89, N° 287 - décembre 2005, p. 178

J

86. JACQUES J.-P. Quand la science se refroidit, le droit éternue!. JDJ-RAJS n°285 - mai 2009
87. JOUVE J.-L., BOLLIN G., LAUNAY F., GLARD Y., CRAVIARI T., GUILLAUME J.-M., PANUEL M. Cartilage de croissance et croissance en orthopédie. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Appareil locomoteur, 14-009-A-10, 2009 : 1-15
88. Jurisprudence, droit des étrangers. JDJ n°229 - novembre 2003 : 35-44. http://www.jdj.be/public_archives/JDJB229.pdf?PHPSESSID=1d7ccad8e7478caa3da7c50eb7d4e762

K

89. KALIFA G., MERZOUG V. Maturation du squelette au cours de la puberté. Médecine Thérapeutique Endocrinologie et Reproduction. Volume 1, Numéro 3, 273-6, Décembre 1999, Diagnostic
90. KAMINA P. Anatomie Clinique, Tome 1, Anatomie générale et Membres. 3ème édition 2006, Maloine
91. KAMINA P. Dictionnaire Atlas d'Anatomie, P-Z. Maloine S.A. Editeur, 1983. P : 1348-1357
92. KOBANDA D. Mineurs isolés étrangers : quelle définition ? quelle approche d'accompagnement ?. Editions, Centre d'Information et d'Etudes sur les Migrations Internationales, « Migrations Société », 2010/3 N° 129-130. 197-206. https://www.cairn.info/revue-migrations-societe-2010-3-page-197.htm

L

93. LALYS L., PINEAU J-C., SERRE T., BARTOLI C., LEONETTI G. Evolution séculaire des dimensions anthropométriques chez des enfants français âgés de trois à 11 ans, entre 1953 et 2005. C. R. Biologies 335 (2012) 129–134
94. LAMTALI S. Croissance et maturation osseuse des enfants scolarisés âgés de 7 à 18 ans de la ville de Marrakech. Thèse de doctorat : Université CADDI Ayyad - Marrakech, 2009 b. https://www.researchgate.net/publication/285927231
95. LANGMAN J. Abrégé d'embryologie médicale. 3ème édition 1976, Masson. P :152-157

96. LARSEN W. J. Embryologie humaine. 2ème édition française, de boeck, 2007. P : 315-47
97. LAVASTRE D. Brève introduction à la Radiographie numérique. https://www.linkedin.com/pulse/brève-introduction-à-la-radiographie-numérique-david-lavastre/?originalSubdomain=fr
98. LE BOUC Y., DUHAMEL J-F., CRÉPIN G. et Coll. RAPPORT : Conséquences de la pratique sportive de haut niveau chez les adolescentes : l'exemple des sports d'apparence. Académie Nationale de Médecine, 2018
99. LECLERC A., LELLOUCH J. Glossaire statistique et épidémiologique. Encycl Méd Chir (Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS, Paris, tous droits réservés), Toxicologie-Pathologie professionnelle, 16-905-A-10, 2000, 15 p.
100. LEMAIGNEN A., BUZELE R., DRUON J., BEMER P., GRAS G., ARVIEUX C., ROSSET P., BERNARD L. Infections ostéo-articulaires (IOA) de l'enfant et de l'adulte. La Revue du Praticien, Vol. 65, January 2015
101. LODER R. T., ESTLE D. T., MORRISON K., EGGLESTON D., FISH D. N., GREENFIELD M. L., GUIRE K. E. Applicability of the Greulich and Pyle skeletal age standards to black and white children of today. Am J Dis Child. 1993 Dec ; 147 (12) :1329-33
102. Loi n° 15-12 du 28 Ramadhan 1436 correspondant au 15 juillet 2015 relative à la protection de l'enfant. Journal Officiel de la République Algérienne, N° 39
103. Loi n° 84-11 du 9 Juin 1984 portant code de la famille, modifiée et complétée par la loi n° 05-09 du 04 Mai 2005 (J.O n° 43 du 22/06/2005) portant approbation de l'ordonnance n° 05-02 du 27 Février 2005 (J.O n° 15 du 27/02/2005) modifiant et complétant la loi n° 84-11
104. LWANGA S.K., LEMESHOW S. Détermination de la taille d'un échantillon dans les études sanométriques, Manuel pratique. Organisation Mondiale de la Santé, 1991

M

105. MAAMERI A. La situation des mineurs isolés étrangers en France et au Canada au XXIème siècle. Laboratoire de recherche interdisciplinaire sur les droits de l'enfant (LRIDE). https://droitcivil.uottawa.ca/laboratoire-recherche-interdisciplinaire-droits-enfant/situation-mineurs-isoles-etrangers-france-au-canada-au-xxieme-siecle
106. MASSIN N., DEMANGE V., BOURGKARD E. Etudes épidémiologiques transversales. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Pathologie professionnelle et de l'environnement, 16-865-A-10, 2011.
107. McINTOSH R. On Growth and Development, Part 1. Anatomical Considerations. Archives of Disease in Childhood. 1957 Aug ; 32 (164) : 261-70 . On growth and development. I. Anatomical considerations - PubMed (nih.gov)
108. Mission Nationale d'Expertise et d'Audit Hospitaliers (MEAH). Radioprotection, Services utilisant les RX : Guide pratique. 2008. Guide 56p v3

N

109. NAHHAS R. W., SHERWOOD R. J., CHUMLEA W. C., DUREN D. L. An update of the statistical methods underlying the FELS method of skeletal maturity assessment. Ann Hum Biol. 2013 ; 40(6): 505–514. doi:10.3109/03014460.2013.806591
110. NEVEU-GIRARD C. Cartographie des 3 principaux points d'ossification épiphysaires chez le fœtus entre 30 et 38 SA : actualisation 2011. Médecine humaine et pathologie. 2011. ffdumas-00633682
111. Nations Unies, Conseil économique et social, Commission de statistique. Lancement du Programme des Nations Unies relatif à l'identité juridique : une approche globale de l'enregistrement des faits d'état civil, des statistiques de l'état civil et de la gestion de l'identité. Rapport du Secrétaire général. E/CN.3/2020/15. Mars 2020

O

112. OLIVIER G. Formation du squelette des membres chez l'homme. Vigot Frères, Editeurs, 1962
113. OLIVIER G. Les caractères primitifs du squelette appendiculaire de l'embryon humain. In : Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris, XI° Série, tome 3, fascicule 3, 1962. P : 249-263. 1http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/bmsap_0037-8984_1962_num_3_3_1193
114. Ordonnance n° 70-20 du 19 février 1970 relative à l'état civil. Journal Officiel de la République Algérienne
115. ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. Soixante-troisième Assemblée Mondiale de la Santé. Point 11.7 de l'ordre du jour provisoire. Malformations Congénitales, Rapport du Secrétariat. A63/10, 1ier avril 2010
116. OUZENNOU N. Impact du mode alimentaire et des facteurs environnementaux sur la croissance et l'état nutritionnel des nourrissons de la ville de Marrakech. Thèse de doctorat : Université CADDI Ayyad, Faculté de Sciences - Marrakech, 2008. (1) (PDF) IMPACT DU MODE ALIMENTAIRE ET DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA CROISSANCE ET L'ETAT NUTRITIONNEL DES NOURRISSONS DE LA VILLE DE MARRAKECH (researchgate.net)

P

117. PANSKY B. Embryologie humaine. Edition 1986, Ellipses. P : 178-189
118. PASCAL R. Le peuplement du bassin méditerranéen de 1800 à 2010 : Données disponibles, limites et organisation spatiales. Géographie. Avignon Université, 2020. Français.

119. PFEIFFER S., MAHANEY M. C. ASSESSING THE SKELETAL MATURITY OF THE HAND-WRIST: FELS METHOD. By Alex F. Roche, Wm. Cameron Chumlea, and David Thissen. Springfield, IL: Charles C. Thomas. 1988. viii + 339 pp., figures, tables, appendix, index. $57.50 (cloth). American Journal of Physical Anthropology, Book Reviews, 1989. Assessing the skeletal maturity of the hand-wrist: Fels method. By Alex F. Roche Wm. Cameron Chumlea, and David Thissen. Springfield, IL: Charles C. Thomas. 1988. viii + 339 pp., figures, tables, appendix, index. $57.50 (cloth) | Susan Pfeiffer - Academia.edu
120. PLATZER W. Atlas de poche d'anatomie, appareil locomoteur. 4ème édition 2007. Médecine-Sciences Flammarion. P : 16-17, 110-135, 186-231

Q

121. QUATREHOMME G. Traité d'anthropologie médico-légale. Edition de boeck, 2015. P 1-17, 933-1029

R

122. RADJACK R., DE COIGNAC A. B., STURM G., BAUBET T., MORO M. R. Accueillir et soigner les mineurs isolés étrangers ? Une approche transculturelle. Éditions GREUPP, « Adolescence ». 2012/2 n° 80. 421-432. http://www.cairn.info/revue-adolescence-2012-2-page-421.htm
123. RADJACK R., GUZMAN G., MORO M. R. enfants mineurs isolés. Éditions GREUPP, « Adolescence ». 2014/3 T. 32 n°3. 531-539. https://www.cairn.info/revue-adolescence-2014-3-page-531.htm
124. RAMBEAU m. Radiologie ostéo-articulaire normale de l'enfant. https://www.etudier.com/dissertations/Radiologie-Ost%C3%A9o-Articulaire-Normale-De-l'Enfant/361357.html
125. ROUVIERE H., DELMAS A. Anatomie Humaine, Tome 3 : Membres, Système nerveux central. 14ème édition, Masson

S

126. SAINT-MARTIN P. Apport de l'Imagerie par Résonnance Magnétique dans la détermination de l'âge chez le sujet vivant. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse : Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014
127. SALAGNAC J.-M., DELAIRE J. Prévisions de croissance et orthopédie dento-faciale : intérêts et fiabilité des superpositions ?. Rev. Stomatol. Chir. Maxillofac., 2002 ; 103, 4 : 221-232
128. SANTOS C., FERREIRA M., ALVES F. C., CUNHA E. Comparative study of Greulich and Pyle Atlas and Maturos 4.0 program for age estimation in a Portuguese sample. Forensic Science International 212 (2011) 276.e1–276.e7

129. SARKODIE B. D., OFORI E. K., PAMBO P. MRI to determine the chronological age of Ghanaian footballers. *S Afr J SM* 2013 ; 25(3) : 74-76
130. SCHMELING A., REISINGER W., LORECK D., VENDURA K., MARKUS W, GESERICK G. Effects of ethnicity on skeletal maturation: consequences for forensic age estimations. Int J Legal Med (2000) 113:253–258
131. SCOLAN V. Détermination de l'âge biologique. http://www.medileg.fr
132. SEMPÉ M. Accroissements et Maturations Squelettiques du Coude. 2005
133. SEMPÉ M. Analyse des Accroissements et des Maturations Squelettiques
134. SEMPÉ M. Auxologie et maturation squelettique. 2013
135. SEMPÉ M. Détermination d'un « âge » en pédiatrie. Biométrie Humaine et Anthropologie. 2005, XXII, 1-2, 99-120
136. SEMPÉ M. Évaluation de la maturation squelettique. Réglette EMS. Paris : Serono, 1995
137. SEMPÉ M. La pédiatrie au quotidien : Analyse de la maturation squelettique. Les éditions INSERM et Doin éditeurs, 1987
138. SEMPÉ M. Une étude auxologique française : accroissements et modifications somatiques, séquences du déroulement des acquis
139. SEMPÉ M., Pavia C. Atlas de la maturation squelettique. Simep 1979
140. SERIN J. Apport de l'Imagerie par Résonnance Magnétique du poignet et de la main dans l'estimation de l'âge chez le sujet vivant. Thèse de doctorat en Médecine : Académie d'Orléans –Tours Université François-Rabelais - Faculté de Médecine de Tours, 2014

T

141. TANNER J. M., OSHMAN D., LINDGREN G., GRUNBAUM J. A., ELSOUKI R., LABARTHE D. Reliability and validity of computer-assisted estimates of Tanner-Whitehouse skeletal maturity (CASAS) : comparison with the manual method. Horm Res. 1994;42(6):288-94. doi: 10.1159/000184211. Reliability and validity of computer-assisted estimates of Tanner-Whitehouse skeletal maturity (CASAS): comparison with the manual method - PubMed (nih.gov)
142. Tests osseux (Atlas de Greulich et Pyle et méthode Tanner et Whitehouse). https://www.yumpu.com/fr/document/read/7416914/tests-osseux-atlas-de-greulich-et-pyle-et-methode-tanner-et-
143. TOWLSON C., SALTER J., ADE J. D., et al. Maturity-associated considerations for training load, injury risk, and physical performance in youth soccer : One size does not fit all. J Sport Health Sci 2021; 10: 403-12
144. TUCHMANN-DUPLESSIS H., HAEGEL P. Embryologie, Fascicule 2 : Organogénèse. 2ème édition 1979. Masson. P : 2-11

U

145. UNHCR (Haut-Commissariat des Nations Unies pour les Réfugiés). Note sur les enfants réfugiés EC/SCP/46. 09 juillet 1987. https://www.unhcr.org/fr-fr/excom/scip/4b30a5992c/note-enfants-refugies.html
146. UNICEF (Fonds des Nations Unies pour l'Enfance). Convention internationale des droits de l'enfant. 20 novembre 1989
147. UNICEF (Fonds des Nations Unies pour l'Enfance). Le mariage précoce. DIGEST INNOCENTI (Centre de recherche Innocenti). Numéro 7 - Mars 2001

V

148. VIDAL. Comprendre la courbe de corpulence des enfants. Comprendre la courbe de corpulence des enfants - VIDAL

W

149. WEIR J., ABRAHAMS P. H., SPRATT J. D., SALKOWSKI L. R. Anatomie du corps humain - Atlas d'imagerie (Édition française : Duparc F.). Elsevier Limited, 4ème Édition, 2011
150. Wikipédia. Asynchronisme. Asynchronisme — Wikipédia (wikipedia.org)
151. Wikipédia. Radiologie numérique. Radiologie numérique — Wikipédia (wikipedia.org)
152. WITTSCHIEBER D., OTTOW C., SCHULZ R., PÜSCHEL K., BAJANOWSKI T., RAMSTHALER F., PFEIFFER H., VIETH V., SCHMIDT S., SCHMELING A. Forensic age diagnostics using projection radiography of the clavicle: a prospective multi-center validation study. Int J Legal Med. 2016 Jan;130(1):213-9. Doi : 10.1007/s00414-015-1285-0.

Z

153. ZERGUINE R. Algérie, la responsabilité pénale des mineurs dans l'ordre interne et international. Editions Érès, « Revue internationale de droit pénal ». 2004/1 Vol. 75. 103-119. https://www.cairn.info/revue-internationale-de-droit-penal-2004-1-page-103.htm

ANNEXES

Annexe 1 : Le plan du travail élaboré avec Dr. Yaiche et Dr. Touati

Annexe 2 : La fiche de renseignements

Annexe 3 : Les critères de qualité du cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face

Annexe 4 : La courbe staturo-pondérale - Filles

Annexe 5 : La courbe staturo-pondérale - Garçons

Annexe 6 : La courbe IMC - Filles

Annexe 7 : La courbe IMC - Garçons

Annexe 8 : Le calendrier postnatal, doublé

Annexe 9 : Le classement IMC des Filles

Annexe 10 : Le classement IMC des Garçons

Annexe 11 : Le compte-rendu Maturos - n°1

Annexe 12 : Le compte-rendu Maturos - n°2

Annexe 13 : Les productions scientifiques de l'Auteur sur le thème de l'âge osseux

Annexe 1 :

PLAN DU TRAVAIL

(Dr. YAICHE, Dr. TOUATI)

- Une à deux journées au service de Radiologie pour prise de radiographies du poignet et main gauches
- Recrutement de l'échantillon (patients) :
    - Enfants et adolescents externes (consultants)
    - Enfants et adolescents internes (hospitalisés)

  } entre **6 mois** et **16 ans** et demeurant à **la wilaya d'Annaba**

- L'enfant ou l'adolescent ne doit pas être atteint d'une pathologie affectant la maturation osseuse (maladie cœliaque, endocrinopathies…)
- Consentement (écrit ou verbal) des parents ou accompagnants de la personne, en leur expliquant l'intérêt et la méthode
- Fiche de renseignement (ci-jointe), remplie pour chaque patient
- La prise du cliché radiographique doit respecter la fiche des critères de qualité (ci-joint)

Annexe 2 : **FICHE DE RENSEIGNEMENTS**

Réf. Cliché : n°…… / année ……..

Date de la prise du cliché radiographique : ……

Nom : ……

Prénom : ……

Sexe : ……

Date et lieu de naissance : ……

Age civil (années, mois, jours) **:** ……..

Domicile actuel (commune, quartier) **:** ……

Scolarité : ……..

Poids (en kg) **:** ……..

Taille (en cm) **:** ……..

<u>Statut socio-économique :</u>

- **Niveau d'étude des parents :** ……..…
- **Profession des parents :** ……..
- **Nombre d'enfants :** ……..
- **Equipements et accessoires de l'habitat :**
  (eau, électricité, gaz de ville, TV, téléphone, réfrigérateur, cuisinière, sanitaire intérieur, voiture, PC, tablette, internet)
  ……

  ……

  ……

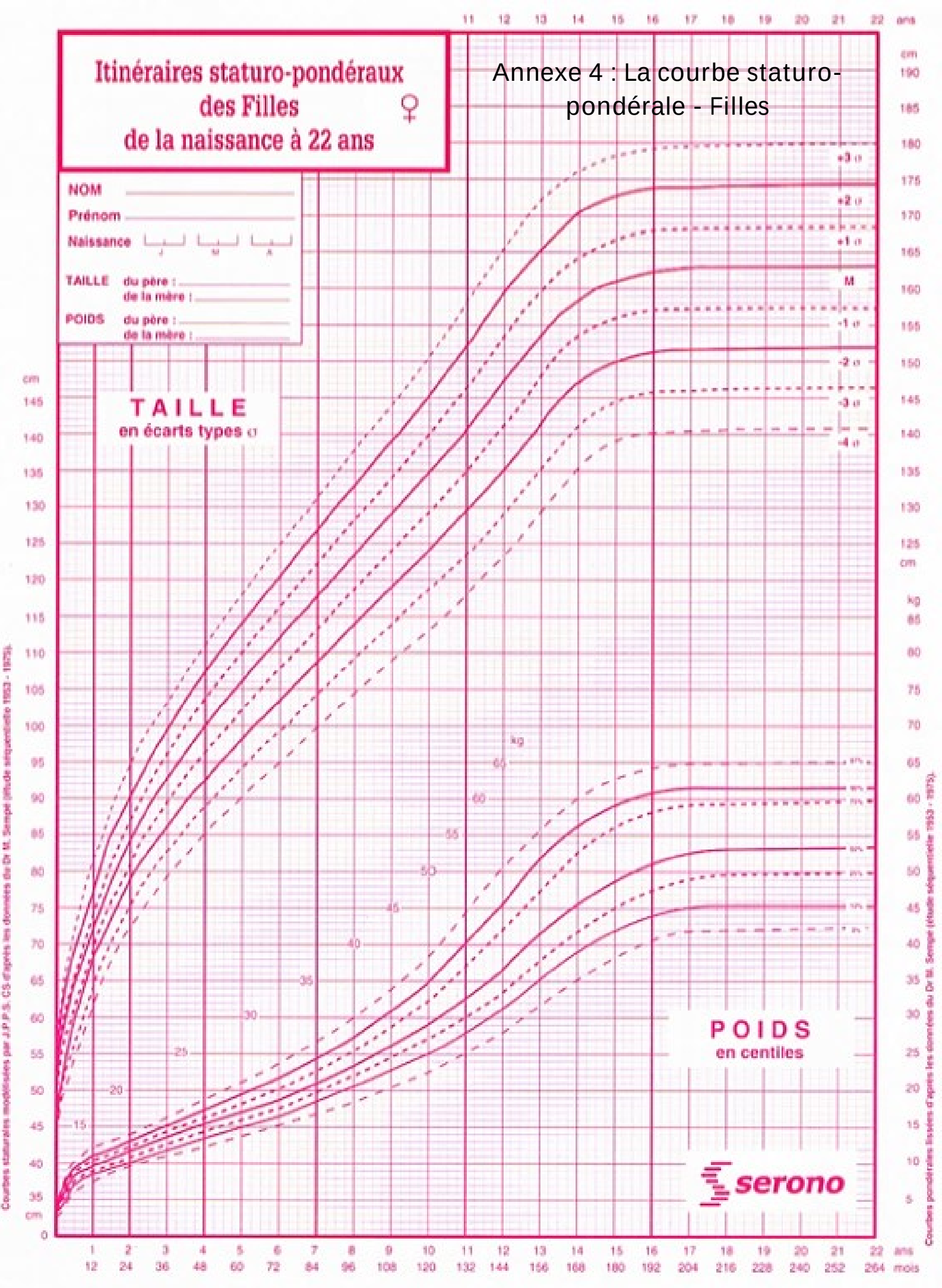
Annexe 3 :

CRITERES DE QUALITE DU CLICHE RADIOGRAPHIQUE

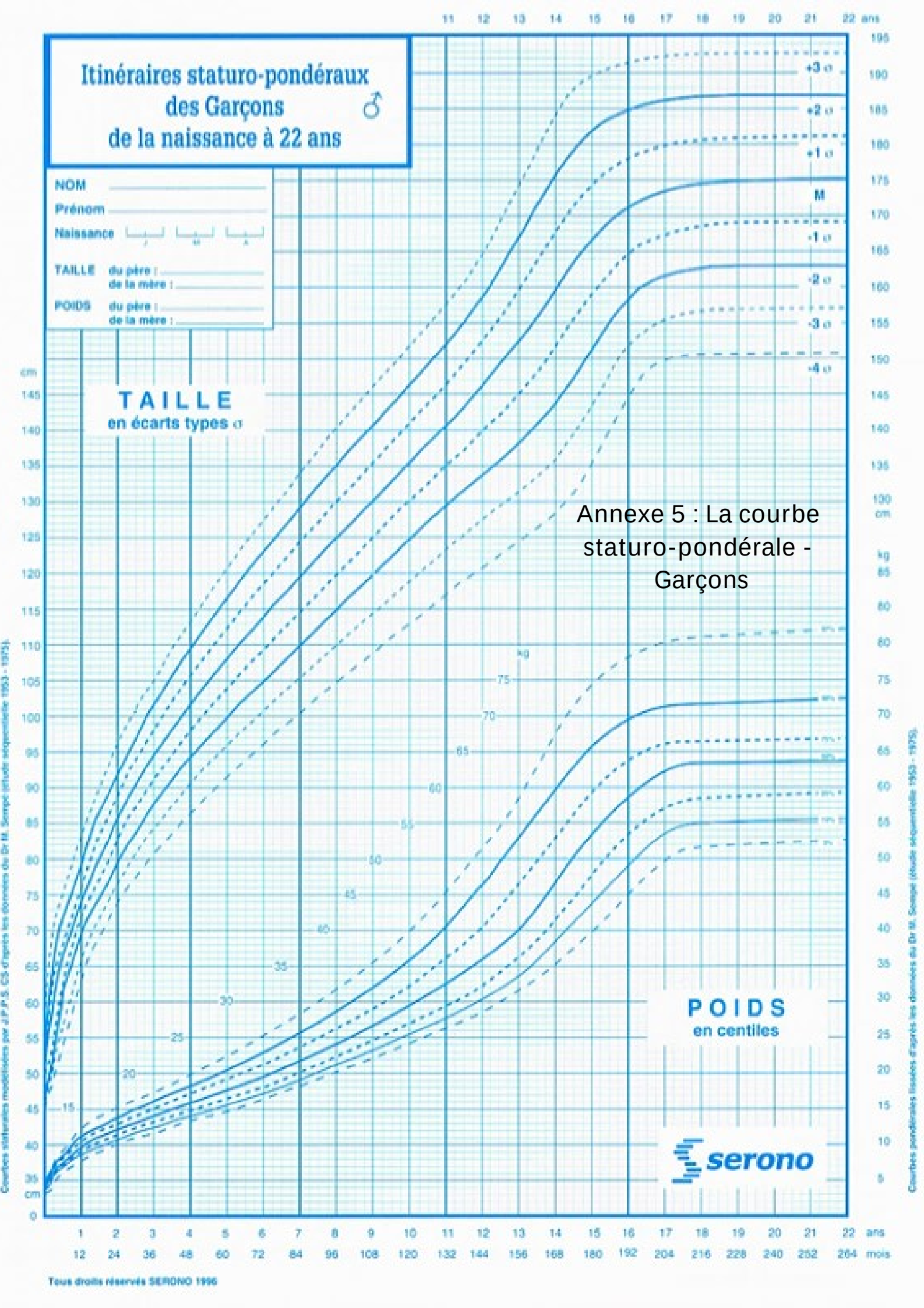
DE LA REGION POIGNET-MAIN GAUCHE DE FACE

- Mentionner sur le cliché : nom et prénom de la personne et la référence (N° / Année)
- Le cliché radiographique de la région poignet-main gauche de face doit être :
    - o De bonne qualité
    - o Suffisamment contrasté
    - o Réalisé à taille réelle et complète (distance tube-film = 300 à 760 mm)
    - o La paume à plat, sur le même plan que le poignet et la totalité de l'avant-bras
    - o Les doigts légèrement écartés
    - o Le pouce est à droite, bien dégagé des autres doigts
    - o Centré sur la tête du 3ème métacarpien et dont l'axe vertical passe par le radius, le lunatum, le capitatum, le 3ème métacarpien et les trois phalanges du médius

Annexe 4 : La courbe staturo-pondérale - Filles

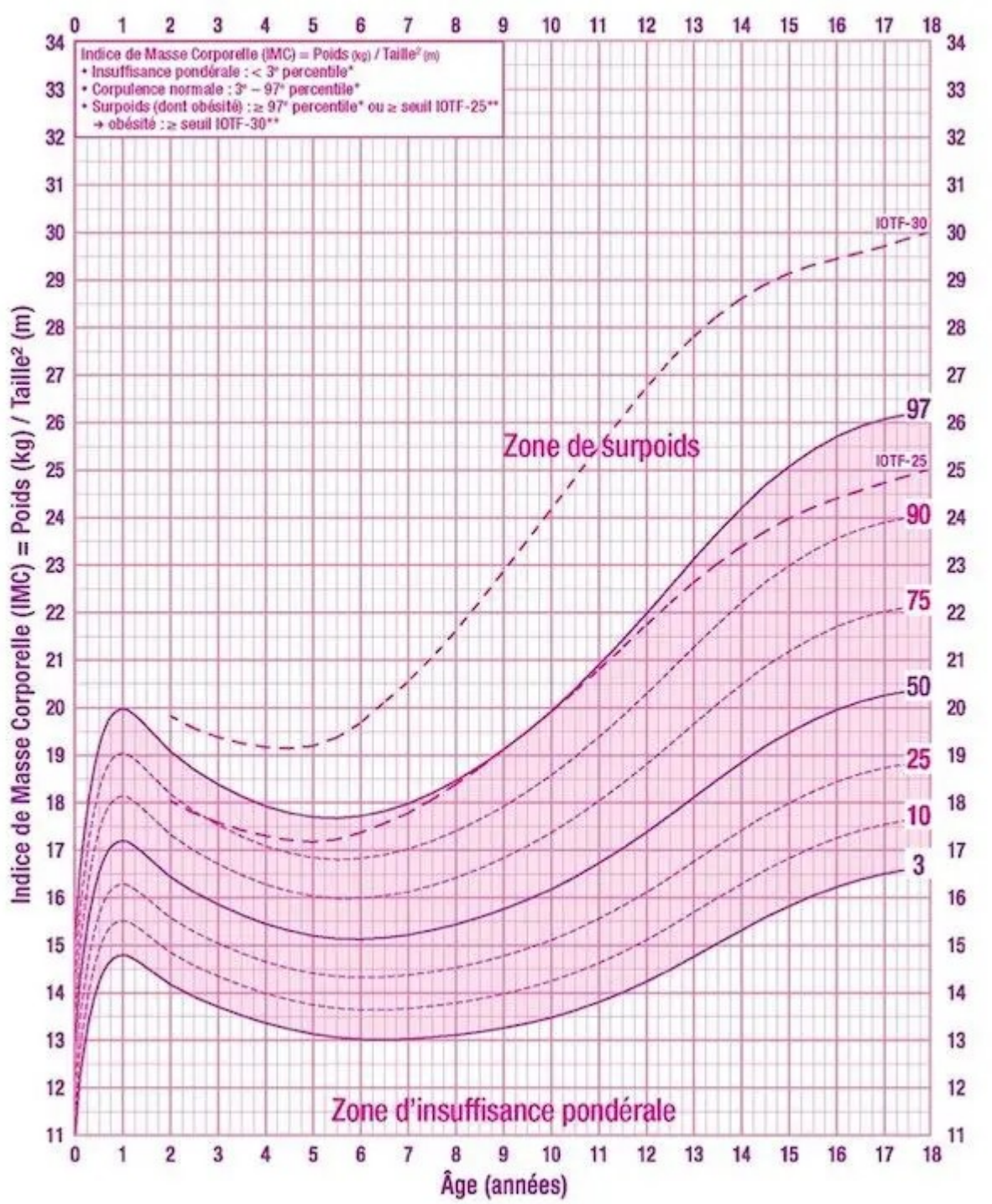


Tous droits réservés SERONO 1996

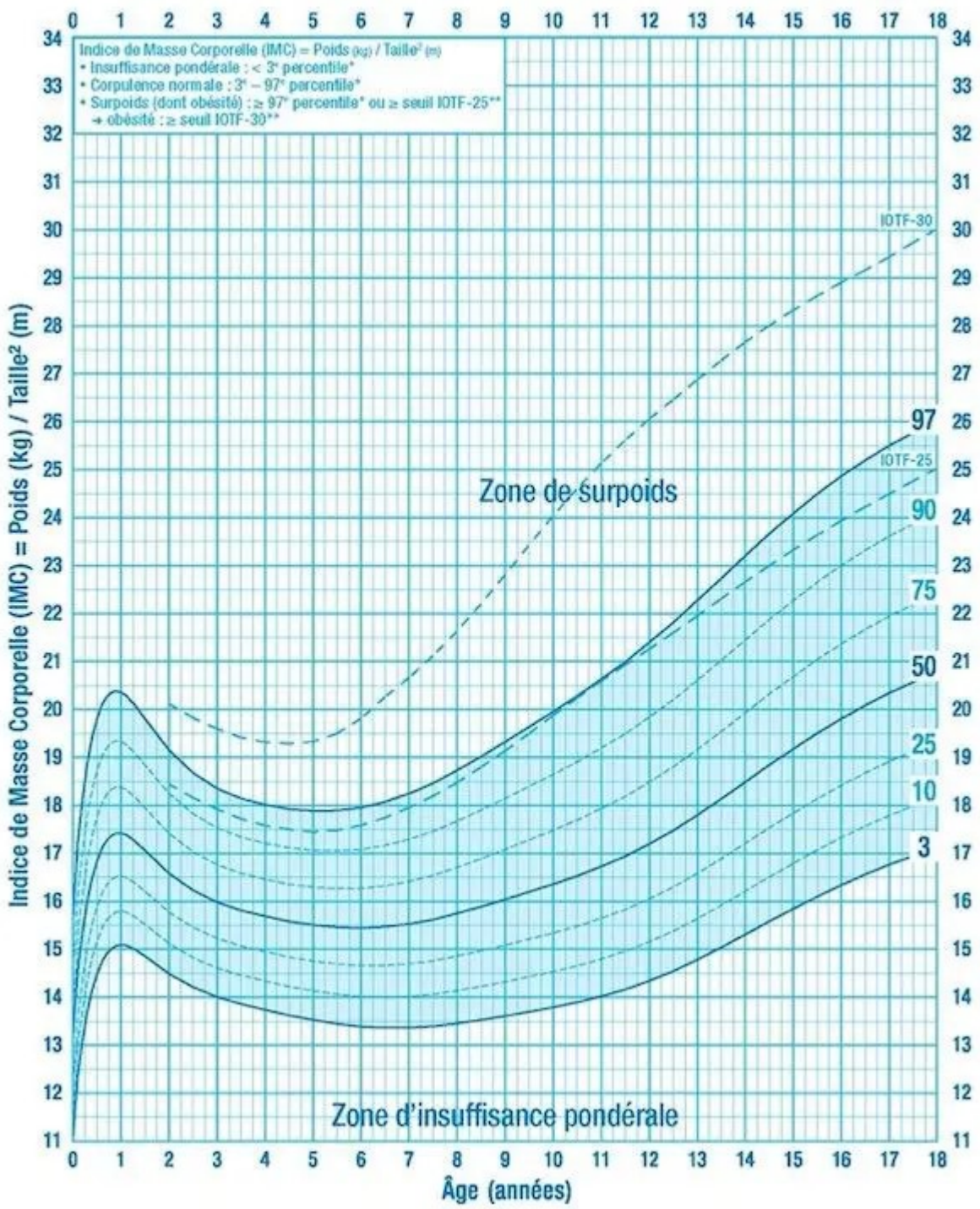


Annexe 5 : La courbe staturo-pondérale - Garçons

Annexe 6 : La courbe IMC - Filles



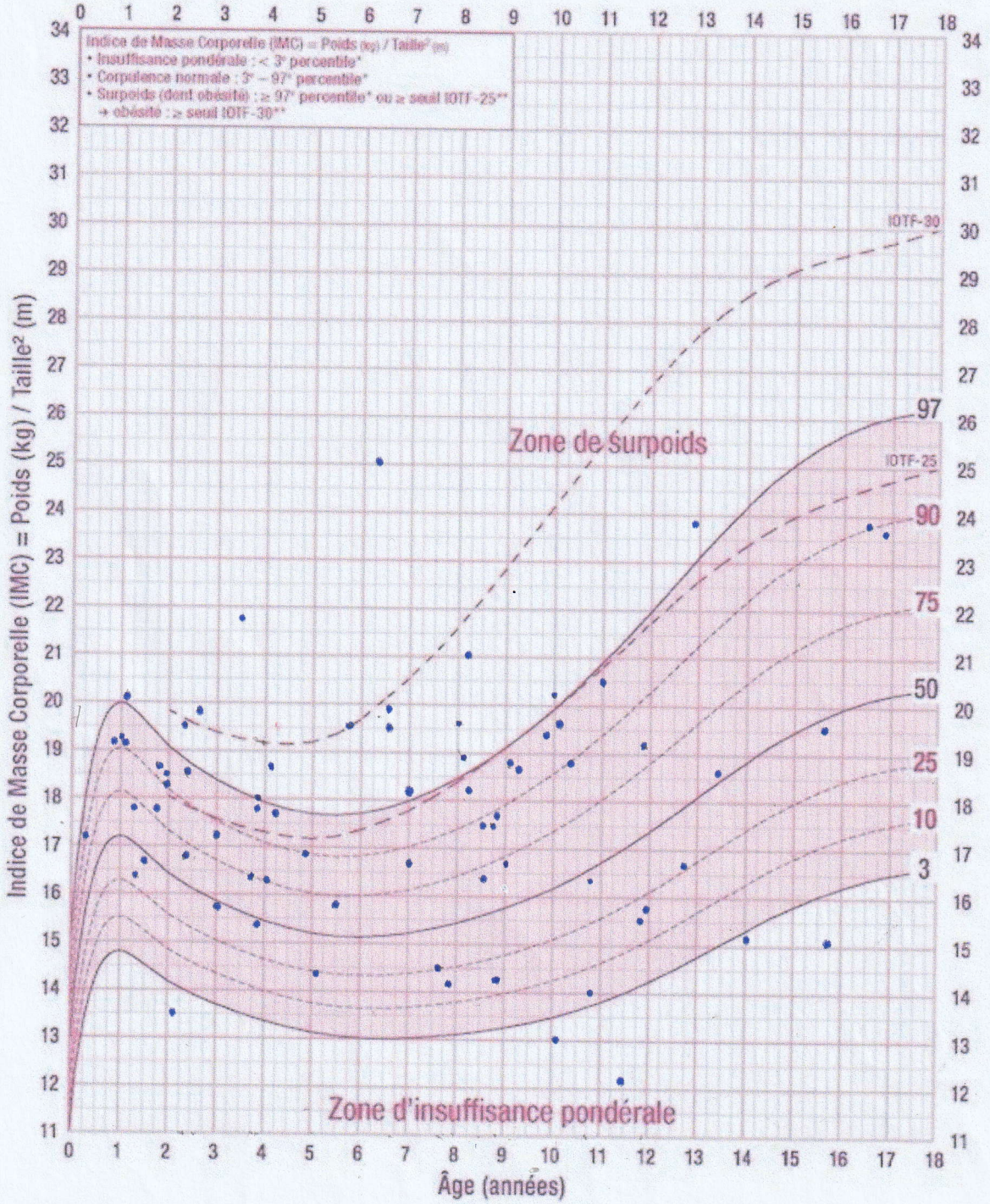
Annexe 7 : La courbe IMC - Garçons



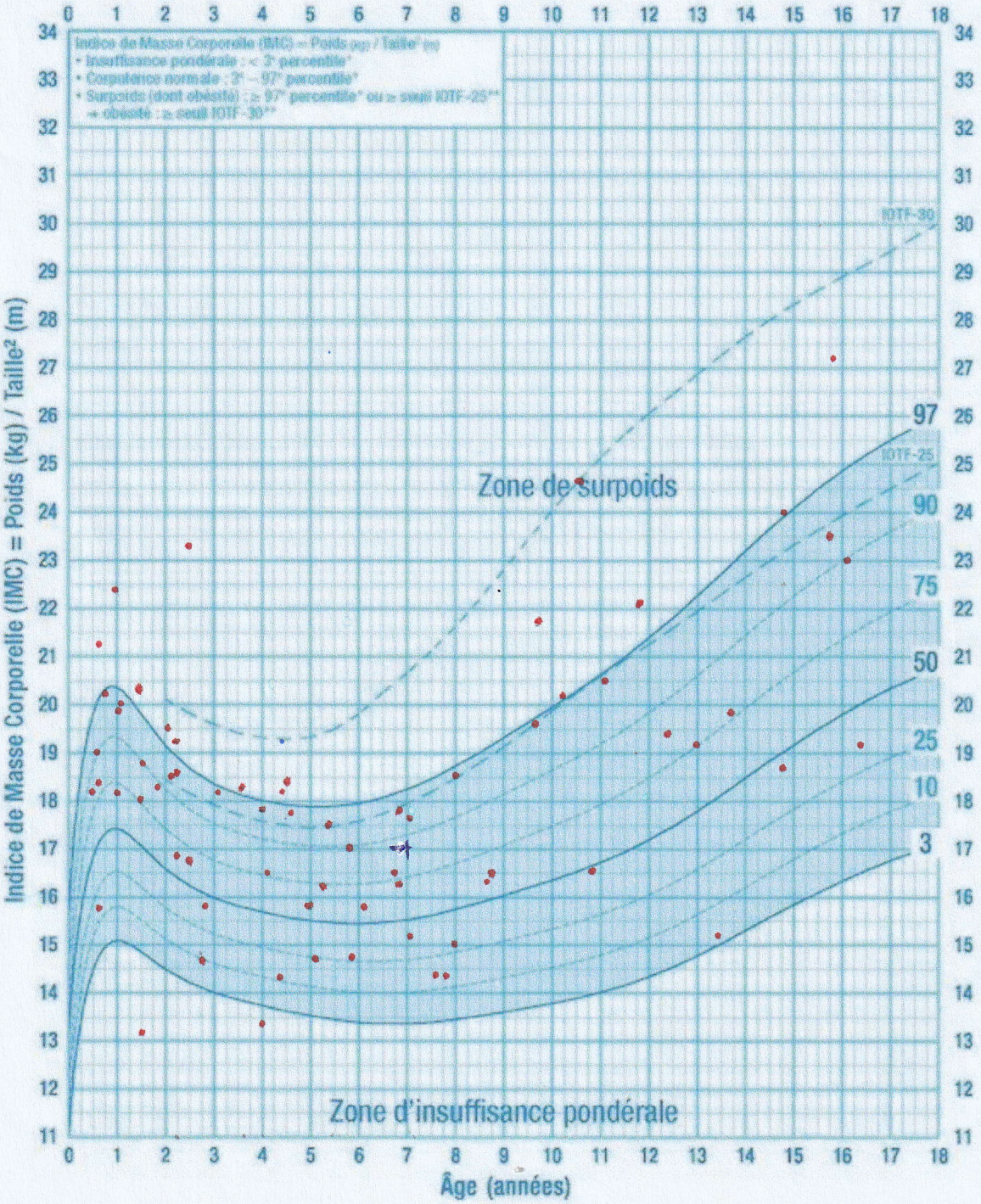
Annexe 8 : **LE CALENDRIER POSTNATAL DOUBLÉ**

MOIS						ANNEES
1	2	3	4	5	6	1ière
7	8	9	10	11	12	
13	14	15	16	17	18	2ème
19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	3ème
31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	4ème
43	44	45	46	47	48	
49	50	51	52	53	54	5ème
55	56	57	58	59	60	
61	62	63	64	65	66	6ème
67	68	69	70	71	72	
73	74	75	76	77	78	7ème
79	80	81	82	83	84	
85	86	87	88	89	90	8ème
91	92	93	94	95	96	
97	98	99	100	101	102	9ème
103	104	105	106	107	108	
109	110	111	112	113	114	10ème
115	116	117	118	119	120	
121	122	123	124	125	126	11ème
127	128	129	130	131	132	
133	134	135	136	137	138	12ème
139	140	141	142	143	144	
145	146	147	148	149	150	13ème
151	152	153	154	155	156	
157	158	159	160	161	162	14ème
163	164	165	166	167	168	
169	170	171	172	173	174	15ème
175	176	177	178	179	180	
181	182	183	184	185	186	16ème
187	188	189	190	191	192	
193	194	195	196	197	198	17ème
199	200	201	202	203	204	

Annexe 9 : Le classement IMC des Filles



Annexe 10 : Le classement IMC des Garçons



Annexe 11 : Le compte-rendu Maturos - n°1

MATUROS 4.0 / 21-08-2024 11h20:20

B A né le 02/05/2016

RESULTATS de l'évaluation de la MATURATION SQUELETTIQUE

Date de la dernière radiographie : 21/08/2024

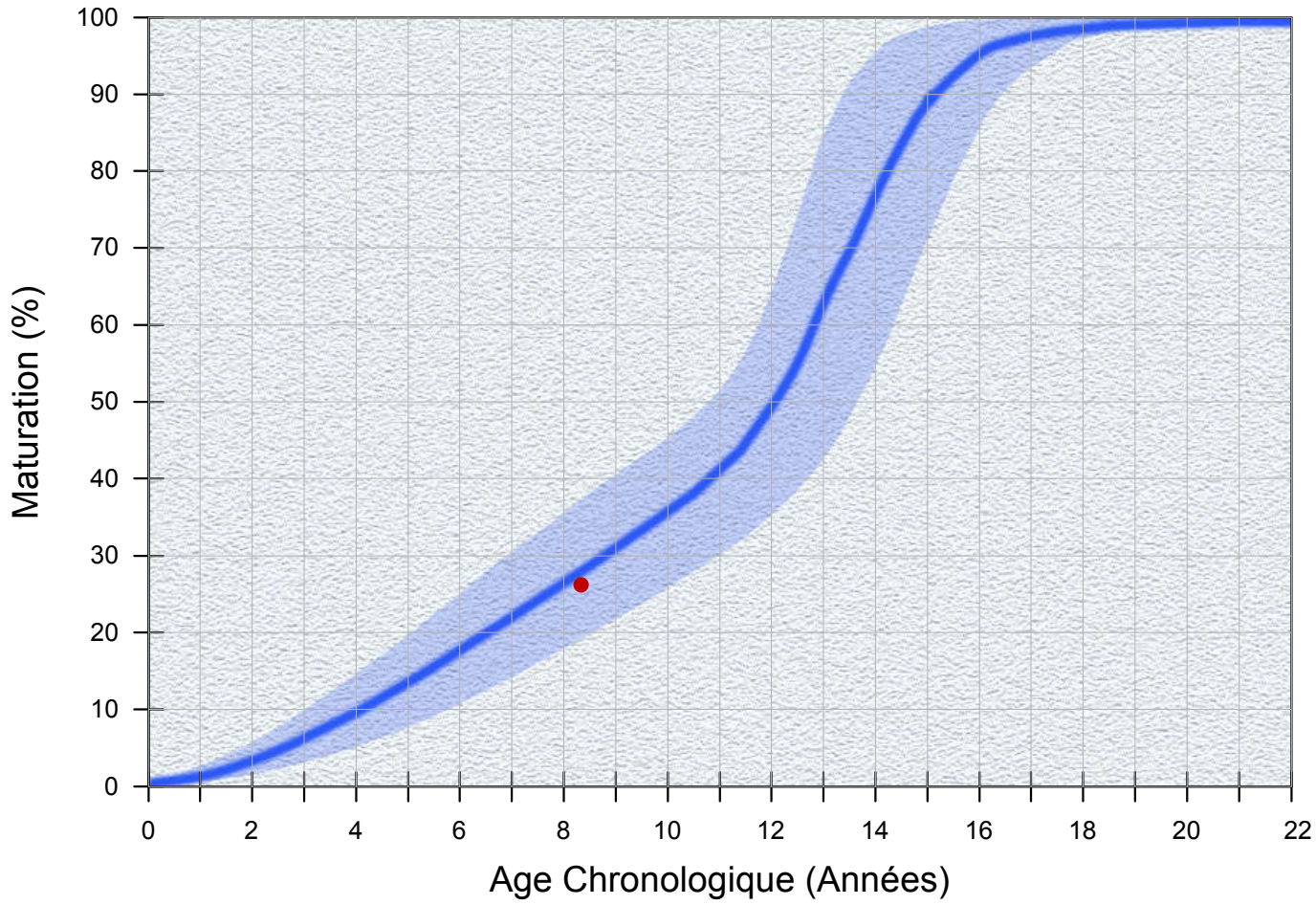
Age chronologique : 8 an(s) et 4 mois (100 Mois)

MATURATION SQUELETTIQUE :
26.3%

Equivalent "âge osseux"
7 an(s) et 10 mois (94 Mois)

Maturation Os courts : 27.9%
Maturation Os longs : 24.6%
Ecart Réduit :-0.6

Situation par rapport à la moyenne ± 2 écart types



Antécédents :

Commentaires :

Annexe 12 : Le compte-rendu Maturos - n°2

MATUROS 4.0 / 21-08-2024 11h22:00

MATURATION SQUELETTIQUE

B A né le 02/05/2016

Examen n°1

Examinateur ABDALLAH Abdeldjalil (Analyse Complète)
Date de la radiographie : 21/08/2024
Age chronologique : 8 an(s) et 4 mois (100 Mois)

Maturation Squelettique : 26.3%

Age squelettique :7 an(s) et 10 mois (94 Mois)
Maturation Os courts : 27.9%
Maturation Os longs : 24.6%
Ecart Réduit :-0.6

Nom	Lettre	Note
Grand os	L+	17.5
Os crochu	L	20
Pyramidal	M	20
Pisiforme	Q	2
Semi lunaire	M	20
Scaphoide	N	20
Trapèze	N	20
Trapèzoide	N	20
Note Os courts		**139**
Epiphyse distale du Radius	M	20
Epihyse distale du Cubitus	P	15
Epiphyse proximale du premier métacarpien	M	10
Epiphyse proximale de la première phalange du pouce	M	10
Premier Sésamoide du pouce	Q	2
Epiphyse proximale de la seconde phalange du pouce	M	10
Epiphyse distale du troisième métacarpien	M	7
Epiphyse distale du Cinquième métacarpien	M	7
Epiphyse proximale de la première phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la première phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la seconde phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la seconde phalange de l'auriculaire	M	7
Epiphyse proximale de la troisième phalange du médius	M	7
Epiphyse proximale de la troisième Phalange de l'auriculaire	M	7
Note Os longs		**123**
Note Totale		**262**

Annexe 13 :

Les productions scientifiques de l'auteur sur le thème de l'âge osseux

Production scientifique de l'auteur sur le thème de l'âge osseux

Ce travail, a donné lieu aux plusieurs productions scientifiques présentées sous formes de communications et de publications.

Les communications :

1. **ABDALLAH Abdeldjalil**, DANOUNE Abdelmalek. **« MATUROS 4.0 : vers une lecture automatisée de l'âge osseux »** (communication orale). 1er Congrès International de Biotechnologie d'Annaba : Challenges et Perspectives. Annaba le 19 et 20 Novembre 2011. (Organisateur : Laboratoire de Biotechnologie et Développement de Santé)
2. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, SOUSSA Chahrazed, DANOUNE Abdelmalek. **« Estimation de la maturation squelettique d'un groupe d'enfants et adolescents algériens âgés de 7 mois à 14 ans en appliquant la méthode de Sempé : résultats préliminaires »** (Communication affichée et présentation flash). 23èmes Journées du Collège des Histologistes, Embryologistes et Cytogénéticiens (CHEC) et 100èmes congrès de l'Association des Morphologistes (AM). Caen (France) du 22 au 24 mars 2018.
3. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, DANOUNE Abdelmalek. **« Développement maturatif des os du poignet et de la main chez l'enfant et l'adolescent : intérêt dans l'évaluation de la maturation squelettique »** (Communication affichée et présentation flash). 23èmes Journées du Collège des Histologistes, Embryologistes et Cytogénéticiens (CHEC) et 100èmes congrès de l'Association des Morphologistes (AM). Caen (France) du 22 au 24 mars 2018.
4. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, SOUSSA Chahrazed, DANOUNE Abdelmalek. **« Recherche de quatre critères radiologiques de la puberté chez un groupe d'enfants et d'adolescents algériens en appliquant la méthode de Sempé : résultats préliminaires »** (Communication orale). 24èmes Journées du Collège des Histologistes, Embryologistes et Cytogénéticiens (CHEC) et 101èmes congrès de l'Association des Morphologistes (AM). Rennes (France) du 14 au 16 mars 2019.
5. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, SOUSSA Chahrazed, DANOUNE Abdelmalek. **« Etude de la maturation squelettique des os du carpe par la méthode de Sempé chez un groupe d'enfants et d'adolescents algériens : résultats préliminaires »** (Communication affichée). 24èmes Journées du Collège des Histologistes, Embryologistes et Cytogénéticiens (CHEC) et 101èmes congrès de l'Association des Morphologistes (AM). Rennes (France) du 14 au 16 mars 2019.
6. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, SOUSSA Chahrazed, DANOUNE Abdelmalek. **« Etude de l'applicabilité de la méthode de Sempé utilisée dans**

l'estimation de la maturation squelettique d'un groupe d'enfants et d'adolescents algériens âgés de 7 mois à 14 ans 6 mois » (Communication orale). 1er Congrès Maghrébin d'Anatomie Clinique (Organisateur : Laboratoire d'Anatomie Médico-chirurgicale de la Faculté de Médecine de Bejaia). Béjaia du 15 au 17 Juin 2019.

7. **ABDALLAH Abdeldjalil**, DANOUNE Abdelmalek. **« Le MATUROS 4.0®, comment çà marche ? »** (Communication affichée). 1er Congrès Maghrébin d'Anatomie Clinique (Organisateur : Laboratoire d'Anatomie Médico-chirurgicale de la Faculté de Médecine de Bejaia). Béjaia du 15 au 17 Juin 2019.
8. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, DANOUNE Abdelmalek. **« Un double numérique pour l'estimation de l'âge osseux »** (Communication orale). 1ère journée thématique sur l'Anatomie Numérique « L'Anatomie Numérique au Service de la Clinique » (Organisateurs : Laboratoire d'Anatomie Clinique d'Alger et Service de Pneumophtisiologie du CHU Mustapha). Alger le 14 décembre 2023.
9. **ABDALLAH Abdeldjalil**, BOUKOFFA Sacia, DANOUNE Abdelmalek. **« Etude de l'influence du statut socio-économique et de l'incidence de masse corporelle sur la maturation squelettique estimée par la méthode de Sempé d'un groupe d'enfants et d'adolescents algériens âgés de 7 mois à 16 ans »** (Communication orale). 1ier congrès international de la médecine préventive (Organisateurs : Association Najda Humanitaire et World Islamic Health Union (WIHU)). Alger du 14 au 16 décembre 2023.

Les publications :

De même, trois résumés de mes communications ont été publiés dans la revue indexée « Morphologie » :

1- **« Estimation de la maturation squelettique d'un groupe d'enfants et adolescents algériens âgés de 7 mois à 14 ans en appliquant la méthode de Sempé : résultats préliminaires »**
Abdeldjalil Abdallah, Sacia Boukoffa, Chahrazed Soussa, Abdelmalek Danoune
Morphologie, Volume 102, Issue 338, September 2018, Page 167

2- **« Étude de la maturation squelettique des os du carpe par la méthode de Sempé chez un groupe d'enfants et adolescents algériens : résultats préliminaires »**
Abdeldjalil Abdallah, Sacia Boukoffa, Chahrazed Soussa, Abdelmalek Danoune
Morphologie, Volume 103, Issue 342, November 2019, Page 89

3- **« Recherche de quatre critères radiologiques de la puberté chez un groupe d'enfants et d'adolescents algériens en appliquant la méthode de Sempé : résultats préliminaires »**
Abdeldjalil Abdallah, Sacia Boukoffa, Chahrazed Soussa, Abdelmalek Danoune
Morphologie, Volume 103, Issue 342, November 2019, Page 114

RÉSUMÉS

RÉSUMÉ

Le développement d'un enfant résulte de deux processus biologiques étroitement corrélés, la croissance et la maturation osseuse. L'évaluation de degré de la maturation squelettique est appelée « âge osseux », il correspond à l'état de la maturation d'un individu en référence à celle de la majorité des individus de mêmes sexe et âge, ce qui envisage de rapporter les paramètres cliniques non pas à l'âge civil mais à l'état de la maturation squelettique.

L'évaluation de la maturation squelettique apparaît essentielle, en particulier en : pédiatrie, endocrinologie pédiatrique, orthopédie pédiatrique, orthodontie, médecine du sport et médecine légale.

Cependant, malgré cet intérêt donné à l'âge osseux appliqué dans un but médical et médico-légal, il restera un élément du développement de l'enfant parmi plusieurs, et il doit être intégrer, par conséquent, dans le contexte clinique et biologique et compléter par d'autres explorations morphologiques, il n'a d'intérêt que s'il est pondéré par les caractères sexuels secondaires et par la vitesse de croissance annuelle.

Notre étude sur la maturation squelettique est prospective, de type transversal analytique, portait sur 138 enfants et adolescents des deux sexes, qui habitent la Wilaya d'Annaba, et ne présentaient aucun trouble de croissance, recrutés parmi ceux qui consultent à la clinique pédiatrique Sainte Thérèse (Ville d'Annaba) et parmi nos connaissances personnelles ; pour chacun, nous avons réalisé un seul cliché radiographique de la région du poignet et de la main gauche. Tous ces clichés ont été analysés et l'âge osseux a été estimé par la méthode du Professeur Michel SEMPÉ, en utilisant le logiciel MATUROS 4.0 (version informatisée établie sur le fondement des travaux du Pr. SEMPÉ).

La méthode de Sempé est conçue pour déterminer le taux de la maturation squelettique du poignet et de la main gauche et par conséquent, donner l'âge osseux de l'enfant et de l'adolescent par rapport à leur âge civil déjà connu.

Notre étude conclut que la méthode de Sempé dédiée à l'évaluation de la maturation squelettique est fiable pour l'appliquer sur la population contemporaine d'enfants et d'adolescents algériens, ainsi que le Logiciel Maturos®4.0 et ses standards définis par cette méthode.

D'un autre côté, le suivi de l'évolution de la maturation squelettique nous a conduit à tracer le schéma d'ossification à partir des clichés radiographiques. L'analyse du schéma d'ossification nous a permis de superposer les intervalles temporels de la maturation aux données de Sempé, de distinguer les trajets multidirectionnels de la maturation, de confirmer le décalage de maturation en faveur des filles par rapport aux garçons, de mettre le doigt sur trois critères osseux radiologiques qui coïncideraient au déclenchement de la puberté, et d'éditer un Atlas préliminaire de la maturation squelettique.

Par ailleurs, nous avons recueilli deux types de données de notre population, les données anthropométriques (poids et taille) pour calculer l'indice de masse corporelle (IMC) et les données socio-économiques, afin d'évaluer le statut socio-économique (SSE). Les enfants et les adolescents de notre population ont été classés selon trois catégories de corpulence (IMC) et trois groupes socio-économiques (SSE).

Le but été de rechercher d'éventuelles corrélations entre la maturation squelettique et ces deux paramètres, l'IMC et le SSE.

Notre étude confirme les interrelations significatives entre la maturation squelettique, l'indice de masse corporelle et le statut socio-économique, avec une corrélation significativement forte qui unit la maturation squelettique avec l'indice de masse corporelle (IMC), une corrélation relativement forte qui unit la maturation squelettique avec le statut socio-économique (SSE), et une corrélation relativement forte qui unit l'indice de masse corporelle avec le statut socio-économique.

Mots clés :

Maturation squelettique, âge osseux, âge civil, méthode de Sempé, Maturos, radiographie du poignet et de la main gauche, évolution de la maturation squelettique, critères osseux de puberté, atlas de maturation squelettique, indice de masse corporelle, statut socio-économique

Dr. ABDALLAH Abdeldjalil (Email: abourahaf_dz@yahoo.fr)

SUMMARY

The development of a child results from two closely correlated biological processes, growth and bone maturation. The assessment of the degree of skeletal maturation is called “bone age”, it corresponds to the state of maturation of an individual in reference to that of the majority of individuals of the same sex and age, which envisages reporting the clinical parameters not to the civil age but to the state of skeletal maturation.

The assessment of skeletal maturation appears essential, particularly in : pediatrics, pediatric endocrinology, pediatric orthopedics, orthodontics, sports medicine and forensic medicine.

However, despite this interest given to bone age applied for medical and medico-legal purposes, it will remain one element of child development among several, and it must be integrated, consequently, in the clinical and biological context and completed by other morphological explorations, it is only of interest if it is weighted by secondary sexual characteristics and by the annual growth rate.

Our study on skeletal maturation is prospective, of analytical cross-sectional type, concerned 138 children and adolescents of both sexes, who live in the Wilaya of Annaba, and did not present any growth disorder, recruited among those who consult at the pediatric clinic Sainte Thérèse (City of Annaba) and among our personal acquaintances ; for each, we made a single X-ray of the wrist region and the left hand.

All these shots were analyzed and the bone age was estimated by the method of Professor Michel SEMPÉ, using the MATUROS 4.0 software (computerized version established on the basis of the work of Pr. SEMPÉ).

The Sempé method is designed to determine the rate of skeletal maturation of the left wrist and hand and therefore give the bone age of the child and adolescent in relation to their already known civil age.

Our study concludes that the Sempé method dedicated to the evaluation of skeletal maturation is reliable to apply it on the contemporary population of Algerian children and adolescents, as well as the Maturos®4.0 Software and its standards defined by this method.

On the other hand, monitoring the evolution of skeletal maturation led us to trace the ossification pattern from radiographic images. Analysis of the ossification pattern allowed us to superimpose the temporal intervals of maturation on Sempé's data, to distinguish the multidirectional paths of maturation, to confirm the maturation shift in favor of girls compared to boys, to pinpoint three radiological bone criteria that would coincide with the onset of puberty, and to publish a preliminary Atlas of skeletal maturation.

Furthermore, we collected two types of data from our population, anthropometric data (weight and height) to calculate body mass index (BMI), and socioeconomic data, to assess socioeconomic status (SES). Children and adolescents in our population were classified into three body size categories (BMI) and three socioeconomic groups (SES).

The aim was to look for possible correlations between skeletal maturation and these two parameters, BMI and SES.

Our study confirms the significant interrelationships between skeletal maturation, body mass index, and socioeconomic status, with a significantly strong correlation between skeletal maturation and body mass index (BMI), a relatively strong correlation between skeletal maturation and socioeconomic status (SES), and a relatively strong correlation between body mass index and socioeconomic status.

Keywords:

Skeletal maturation, bone age, civil age, Sempé method, Maturos, left wrist and hand radiography, evolution of skeletal maturation, bone criteria of puberty, skeletal maturation atlas, body mass index, socioeconomic status

Dr. ABDALLAH Abdeldjalil (Email: abourahaf_dz@yahoo.fr)

ملخص

ينشأ نمو الطفل من عمليتين بيولوجيتين مترابطتين بشكل وثيق، النمو و نضج العظام. يسمى تقييم درجة نضج الهيكل العظمي "العمر العظمي"، وهو يتوافق مع حالة نضج الفرد بالنظر إلى حالة غالبية الأفراد من نفس الجنس و العمر، و هو ما يُنصح توخي ربط المعلمات السريرية لا بالعمر المدني و لكن بحالة نضوج الهيكل العظمي.
يبدو تقييم نضج الهيكل العظمي أمرًا ضروريًا، لا سيما في : طب الأطفال، و أمراض الغدد الصماء لدى الأطفال، و جراحة عظام الأطفال، و تقويم الأسنان، و الطب الرياضي، و الطب الشرعي.
ومع ذلك، على الرغم من هذا الإهتمام المعطى لعمر العظام المطبّق للأغراض الطبية و الطبية الشرعية، فإنه سيظل عنصرًا واحدًا من بين عدة عناصر لنمو الطفل، و بالتالي يجب دمجه في السياق السريري و البيولوجي و استكماله باستكشافات جسمانية أخرى. إنها ليست ذات أهمية إلا إذا تم ترجيحها بالخصائص الجنسية الثانوية و معدل النمو السنوي.
دراستنا حول نضوج الهيكل العظمي هي دراسة مستقبلية، من النوع التحليلي المقطعي، تركز على 138 طفلًا و مراهقًا من كلا الجنسين، الذين يعيشون في ولاية عنابة، و لم تظهر عليهم أي اضطرابات في النمو، تم اختيارهم من بين أولئك الذين يعاينون في مستشفى سانت تيريز للأطفال (مدينة عنابة) و من بين معارفنا الشخصية؛ لكل واحد أخذنا صورة أشعة سينية واحدة لمنطقة الرسغ و اليد اليسرى. تم تحليل كل هذه الصور وتقدير عمر العظام باعتماد طريقة البروفيسور ميشيل سيمبي (Michel SEMPÉ)، باستخدام برنامج MATUROS 4.0 (نسخة محوسبة تم إنشاؤها على أساس أبحاث البروفيسور سيمبي).
تم تصميم طريقة Sempé لتحديد معدل نضوج الهيكل العظمي للرسغ و اليد اليسرى، و بالتالي تحديد العمر العظمي للطفل و المراهق مقارنة بعمرهما المدني المعروف سلفاً.
خلصت دراستنا إلى أن طريقة Sempé المخصوصة لتقييم نضج الهيكل العظمي يمكن الإعتماد عليها لتطبيقها على فئة الأطفال و المراهقين الجزائريين المعاصرين، بالإضافة إلى برنامج Maturos®4.0 و معاييره المحدّدَة بهذه الطريقة.
من ناحية أخرى، فإن مراقبة تطور نضوج الهيكل العظمي قادتنا إلى تتبع نمط التعظم من صور الأشعة السينية. سمح لنا تحليل نمط التعظم بتركيب الفترات الزمنية للنضج على بيانات سيمبي، و التمييز بين مسارات النضج متعددة الاتجاهات، و تأكيد التحول في النضج لصالح الفتيات مقارنة بالفتيان، و وضع الإصبع على ثلاثة معايير إشعاعية للعظام و التي تتزامن مع بداية سن البلوغ، و إصدار أطلس أولي لنضج الهيكل العظمي.
علاوة على ذلك، قمنا بجمع نوعين من البيانات من عينتنا، بيانات القياسات البشرية (الوزن و الطول) لحساب مؤشر كتلة الجسم (IMC)، و البيانات الاجتماعية والاقتصادية لتقييم الوضع الاجتماعي والاقتصادي (SSE). تم تصنيف الأطفال و المراهقين في عينتنا وفقًا لثلاث فئات لوزن الجسم و ثلاث مجموعات اجتماعية و اقتصادية.
كان الهدف هو البحث عن الارتباطات المحتملة بين نضوج الهيكل العظمي و هذين المَعْلَمين، مؤشر كتلة الجسم و الوضع الاجتماعي والاقتصادي.
تؤكد دراستنا العلاقات المتبادلة الهامة بين نضوج الهيكل العظمي و مؤشر كتلة الجسم و الحالة الاجتماعية و الاقتصادية، مع وجود علاقة قوية بشكل ملحوظ بين نضوج الهيكل العظمي و مؤشر كتلة الجسم، و وجود ارتباط قوي نسبيًا بين نضوج الهيكل العظمي و الوضع الاجتماعي و الاقتصادي، و وجود علاقة قوية نسبيًا تربط مؤشر كتلة الجسم بالحالة الاجتماعية والاقتصادية.

الكلمات المفتاحية :
نضوج الهيكل العظمي، عمر العظام، العمر المدني، سمبي، طريقة ماتوروس، التصوير الشعاعي للمعصم و اليد اليسرى، تطور نضوج الهيكل العظمي، معايير العظام للبلوغ، أطلس نضوج الهيكل العظمي، مؤشر كتلة الجسم، الحالة الاجتماعية والاقتصادية

الدكتور عبد الله عبد الجليل (البريد الإلكتروني: abourahaf_dz@yahoo.fr)