

Table des matières

I- Introduction générale	8
I-1. Historique de l'application des méthodes d'imagerie à l'estimation de l'âge.....	8
I-2. La densité minérale osseuse (DMO) en anthropologie médico-légale	10
I-2.1. La DMO et le dimorphisme sexuel	10
I-2.2. Un paramètre original pour l'estimation de l'âge.....	11
I-3. Problématiques et objectifs	12
II- Corrélation entre la DMO et l'âge.....	13
II-1. Matériel.....	13
II-1.1. L'échantillon	13
II-1.2. L'acquisition des examens tomodensitométriques	15
II-2. Méthode.....	15
II-2.1. Mesures de densité et récupération des données	15
II-2.2. Analyse morphologique en 3D	16
II-3. Analyses statistiques	18
II-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	18
II-3.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade	18
II-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge.....	18
II-3.4. Corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey	18
II-4. Résultats.....	19
II-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	19
II-4.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade	19
II-4.3. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches	19
II-4.4. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge.....	19
II-4.5. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey	20
II-5. Discussion.....	22
III- Apports méthodologiques de l'utilisation de la DMO.....	23
III-1. Matériel.....	24
III-1.1. L'échantillon de référence	24
III-1.2. L'échantillon test.....	25
III-1.3. L'acquisition des examens tomodensitométriques	25
III-2. Méthode.....	25
III-2.1. Mesures de densité et récupération des données	25

III-2.2. Analyses statistiques	25
III-3. Résultats.....	26
III-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	26
III-3.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches	26
III-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge.....	26
III-3.4. Equations de régression linéaire selon le mode de mesure	27
III-3.5. Fiabilité de l'échantillon de référence.....	28
III-4. Discussion.....	29
IV- Applications du modèle sur des échantillons post-mortem	31
IV-1. Matériel.....	31
IV-1.1. 1 ^{er} échantillon	31
IV-1.2. 2 nd échantillon.....	32
IV-1.3. L'acquisition des examens tomodensitométriques	32
IV-2. Méthode	33
IV-2.1. Mesures de densité et récupération des données	33
IV-2.2. Mesure de l'index d'altération radiologique (RAI).....	34
IV-3. Analyses statistiques.....	36
IV-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	36
IV-3.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches.....	36
IV-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et le RAI.....	37
IV-3.4. Corrélation entre l'âge et la densité osseuse	37
IV-3.5. Estimation de l'âge sur les deux échantillons	37
IV-4. Résultats liés au 1 ^{er} échantillon	37
IV-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	37
IV-4.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches.....	37
IV-4.3. Corrélation entre la densité osseuse et le RAI.....	37
IV-4.4. Corrélation entre l'âge et la densité osseuse	38
IV-4.5. Estimation de l'âge sur les examens tomodensitométriques de cadavres masculins.....	39
IV-5. Résultats liés au 2 nd échantillon.....	39
IV-5.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	39
IV-5.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches.....	39
IV-5.3. Prédiction de l'âge	39
IV-6. Discussion.....	40
IV-6.1. Autour du 1 ^{er} échantillon	40
IV-6.2. Autour du 2 nd échantillon.....	41
IV-6.3. Conclusion.....	42

V- Proposition d'une procédure associant la DMO et la méthode de Brooks et Suchey	44
V-1. Matériel.....	44
V-1.1. L'échantillon de référence	44
V-1.2. L'échantillon test.....	45
V-2. Méthode	46
V-2.1. L'acquisition des examens tomodensitométriques	46
V-2.2. Mesures de densité et récupération des données	46
V-3. Analyses statistiques.....	46
V-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	46
V-3.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade.....	46
V-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge	47
V-3.4. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey	47
V-3.5. Fiabilité de l'échantillon de référence selon 3 méthodes d'estimation de l'âge.....	47
V-4. Résultats.....	48
V-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité.....	48
V-4.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade.....	48
V-4.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge	48
V-4.4. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey	50
V-4.5. Fiabilité de l'estimation de l'âge	51
V-5. Discussion.....	52
VI- Discussion générale	54
VI-1. La DMO en contexte médico-légal.....	54
VI-1.1. La tomodensitométrie comme technique d'estimation de l'âge	54
VI-1.2. Fiabilité de la méthode en post-mortem	54
VI-1.3. Une approche séquentielle de l'estimation de l'âge	55
VI-2. La DMO et ses apports méthodologiques.....	56
VI-2.1. Caractéristiques intrinsèques au paramètre	56
VI-2.2. Le type de mesure et ses applications cliniques	57
VI-3. Perspectives	58
VI-3.1. Prise en compte de facteurs intercurrents	58
VI-3.2. Etude d'autres régions anatomiques	58
VI-3.3. Etude d'autres supports de mesure.....	59
VI-3.4. Estimation du délai post-mortem (DPM).....	59
VII- Conclusion	60

VIII- Références bibliographiques	61
IX- Annexes	67
IX-1. Annexe 1 : Articles publiés à l'origine de ce travail de thèse.....	67
IX-2. Annexe 2 : Travail intermédiaire concernant la variabilité inter-observateurs lors de l'application de la méthode de Brooks et Suchey	90
X- Résumés et mots-clés	97
X-1. Résumé et mots-clés de la thèse en français	97
X-2. Résumé et mots-clés de la thèse en anglais	98

Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques descriptives.	21
Tableau 2 : Equations de régression pour les individus masculins.	28
Tableau 3 : Equations de régression pour les individus féminins.	28
Tableau 4 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins.	28
Tableau 5 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins.	29
Tableau 6 : Cotations permettant le calcul des RAI.	36
Tableau 7 : Equations de régression.	39
Tableau 8 : Estimation de l'âge en fonction de la DMO de différents sites d'os secs d'individus masculins selon l'équation de régression.	40
Tableau 9 : Statistiques descriptives (individus masculins et féminins).	50
Tableau 10 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins par la méthode de Brooks et Suchey et la méthode de la densité osseuse.	51
Tableau 11 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins par la méthode de Brooks et Suchey et la méthode de la densité osseuse.	51
Tableau 12 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins par la méthode combinée.	52
Tableau 13 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins par la méthode combinée.	52

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'individu ayant été exclus compte tenu d'antécédents susceptibles d'interférer avec la mesure de la densité osseuse et l'attribution d'un stade selon la méthode de Brooks et Suchey : arthroplastie bilatérale de hanche.	14
Figure 2 : Histogramme représentant la distribution de l'âge de l'échantillon.	14
Figure 3 : Positionnement des ROIs sur les tiges du fantôme (A) et à droite et à gauche du pubis (B).	16
Figure 4 : Acquisition en 3D de la surface symphysaire droite après utilisation des fonctions « <i>Isosurface</i> », « <i>ExtractSurface</i> » et « <i>Surface Editor</i> ».	17
Figure 5 : Surfaces symphysaires droites représentatives des 6 stades selon les critères morphologiques proposés par Brooks et Suchey (1990).	17
Figure 6 : Nuage de points de la mBD (mg/cm ³ équivalent aqueux de K ₂ HPO ₄) en fonction de l'âge pour les individus masculins (A) et féminins (B).	20
Figure 7 : Diagramme en boîte de la mBD (mg/cm ³ équivalent aqueux de K ₂ HPO ₄) par stade de Brooks et Suchey pour les deux sexes.	21
Figure 8 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon de référence (A : individus masculins, B : individus féminins).	24
Figure 9 : Nuage de points de la densité en HU (A) et de la mBD (mg/cm ³ équivalent aqueux de K ₂ HPO ₄ ; B) en fonction de l'âge pour les individus masculins.	27
Figure 10 : Nuage de points de la densité en HU (C) et de la mBD (mg/cm ³ équivalent aqueux de K ₂ HPO ₄ ; D) en fonction de l'âge pour les individus féminins.	27
Figure 11 : Histogramme représentant la distribution de l'âge de l'échantillon.	32
Figure 12 : Exemple de placement de ROI avec mesure de la DMO en HU sur un examen tomodensitométrique de cadavre.	33
Figure 13 : Exemple de placement de ROI avec mesure de la DMO en HU sur un examen tomodensitométrique d'os sec.	34
Figure 14 : Echelle visuelle permettant de quantifier l'état de putréfaction.	35
Figure 15 : Droite de régression linéaire représentant l'âge en fonction de la densité osseuse chez les individus masculins.	38
Figure 16 : Illustration de la disparité des valeurs de densité osseuse entre les pubis droits et gauches sur un os sec (à droite : 183 HU, à gauche : 43.86 HU).	42
Figure 17 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon de référence (A : individus masculins, B : individus féminins).	45
Figure 18 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon test (C : individus masculins, D : individus féminins).	45

Figure 19 : Droite de régression linéaire représentant l'âge en fonction de la densité osseuse chez les individus masculins (**A**) et féminins (**B**). 49

Figure 20 : Diagramme en boîte de la densité osseuse (en HU) par stade de Brooks et Suchey pour les deux sexes (**A** : individus masculins ; **B** : individus féminins) dans l'échantillon de référence. 50

Rapport-Gratuit.com

I- Introduction générale

I-1. Historique de l'application des méthodes d'imagerie à l'estimation de l'âge

L'estimation de l'âge au décès par l'observation d'indicateurs osseux ou par d'autres méthodes est probablement le paramètre le plus complexe à approcher en anthropologie médico-légale. Le contexte judiciaire dans lequel elle s'inscrit, et qui concerne en médecine légale quotidienne un seul individu, implique d'avoir une fiabilité et une précision les plus optimales possibles. Des modèles de maturation et de dégénérescence osseuse sont utilisés sur des régions anatomiques pour cette estimation. À cette fin, des méthodes sont élaborées puis utilisées en contexte judiciaire. À défaut d'être précises, ces méthodes doivent être fiables et robustes. Parmi les méthodes développées à partir d'indicateurs osseux, les méthodes classiques sont représentées par l'observation de la surface chondrosternale de la 4^{ème} côte (İşcan, 1984), de la surface auriculaire de l'ilium (Lovejoy, 1985) ou encore des sutures crâniennes (Meindl, 1985).

De la même façon, la surface articulaire de la symphyse pubienne est une structure anatomique largement utilisée pour estimer l'âge au décès. Il s'agit d'une articulation fibrocartilagineuse semi-mobile des deux pubis. Elle offre un intérêt considérable notamment en raison de sa maturation tardive. En effet, les changements liés à l'âge sur cette surface continuent après que l'acquisition complète soit terminée et que les autres épiphyses des membres soient fusionnées. Les modifications liées à l'âge de la symphyse pubienne ont été reconnues depuis de nombreuses années, et le premier système formel pour l'utilisation de ces modifications pour estimer l'âge a été développé par Todd (1920), basé sur une collection de 306 hommes d'âge au décès connu. En identifiant et en caractérisant quatre parties de base sur la symphyse pubienne, il a ainsi défini dix phases d'âge de la symphyse pubienne avec une fiabilité plus importante pour les individus âgés en entre 20 et 40 ans.

Par la suite, plusieurs travaux de recherche ont été menés afin de tester la validité de la méthode de Todd (Brooks, 1955 ; McKern et Stewart, 1957).

Gilbert et McKern (1973) ont développé une méthode utilisant un échantillon de 103 femmes d'âge connu. En 1979, Suchey a montré que cette méthode était très peu fiable et sujette à des estimations imprécises.

En 1985, Meindl et al. ont testé l'exactitude de toutes ces méthodes et ont montré que le procédé initial de Todd était plus fiable que les techniques plus récentes par composantes et que toutes les méthodes ont tendance à sous-estimer l'âge.

Selon la méthode développée par Brooks et Suchey (1990), les critères de maturation sont représentés par les noyaux d'ossification supérieur et inférieur et les formations du plateau dorsal et du rempart ventral (stades 1, 2 et 3) et les critères de dégénérescence par le creusement de la surface symphysaire, le « lipping » et les phénomènes d'érosion et d'ossification (stades 4, 5 et 6) (Brooks, 1990).

Le travail de Brooks et Suchey a été développé à partir d'un large échantillon de référence multiethnique, composé de 1225 surfaces symphysaires de 739 individus masculins et 486 individus féminins. A noter que l'âge est documenté pour seulement 273 individus féminins. Ces individus proviennent d'une série autopsique américaine (Los Angeles County Coroner) et ont été recueillis de 1977 à 1979. L'article de Brooks et Suchey a été publié en 1990. Leur méthode est toujours

largement utilisée, notamment dans le domaine de l'anthropologie médico-légale. Les six stades morphologiques ont été élaborés à partir de la combinaison des stades 1, 2 et 3 ; 4, 5 puis 7 et 8 décrits par Todd (Katz, 1986 ; Brooks, 1990 ; Suchey, 1998).

Outre les méthodes classiques décrites précédemment, l'application des techniques d'imagerie, dont la tomodensitométrie, à l'anthropologie médico-légale a connu un essor grandissant ces dernières années (Baccino, 1999 ; Poulsen, 2007 ; Dedouit, 2014). Aussi bien en identification comparative, reconstructive ou lésionnelle, ces techniques ont montré leurs avantages : gain de temps, préservation des structures osseuses, conservation et stockage des données (Sidler, 2007).

Pléthore de méthodes ostéologiques visant à l'identification d'un individu ont bénéficié des avantages de l'imagerie, notamment par sa facilité d'accès et sa rapidité d'utilisation. Une concordance notable a d'ailleurs pu être établie entre l'observation morphologique de l'os sec et la reconstruction tomodensitométrique de ce dernier, aussi bien pour la détermination du sexe, de l'âge, de la stature et de l'appartenance géographique (Dedouit, 2006).

De manière spécifique à l'estimation de l'âge, de nombreuses études ont été développées à partir de l'évaluation de l'architecture de l'os trabéculaire, notamment au niveau du fémur, de la clavicule et de l'humérus (Schranz, 1970 ; Walker, 1985 ; Szilvassy, 1990 ; Macchiarelli, 1994). Ces travaux ont permis l'étude de certains facteurs qualitatifs tels que les lignes de tension diaphysaires et épiphysaires, la surface de la cavité médullaire ou encore la porosité à la surface externe de l'os. Plus récemment, les travaux de Wade (2011) et Villa (2013) ont objectivé les corrélations existantes entre l'âge au décès et les changements dans la structure trabéculaire de l'os coxal.

En se focalisant sur la symphyse pubienne, plusieurs études ont montré l'avantage de la tomodensitométrie, notamment quant à la préservation des vestiges osseux. Les premiers auteurs à scanner 74 surfaces symphysaires de pubis masculins sont Pasquier et al. en 1999 (Pasquier, 1999). Dans cette étude, chaque caractéristique morphologique du système de Brooks et Suchey a été quantifiée avec un procédé spécifique : transformation de Fourier pour l'organisation transverse, mesure du rempart ventral et mesure de l'angle entre le rebord dorsal et la surface symphysaire pour le « lipping ». À ces variables ont été ajoutées d'autres caractéristiques quantitatives comme la texture de l'os trabéculaire par la mesure de la densité osseuse. En 2005, les travaux de Telmon et al étaient en faveur de l'application de la méthode de Brooks et Suchey sur des images en 3D en montrant que la perte d'information liée aux reconstructions 3D des examens tomodensitométriques comparativement à l'os sec entraîne une erreur tout à fait acceptable dans l'attribution des stades (Telmon, 2005). Ces images scanographiques permettent d'accéder de manière simple à des paramètres quantitatifs tels que des mesures d'angles, de longueur ou encore de densité (Pasquier, 1999 ; Castillo, 2011 ; Chiba, 2014 ; Schreiber, 2014 ; Villa, 2015 ; Navega, 2018).

En parallèle de cette transposition des méthodes ostéologiques à l'imagerie, de nouveaux paramètres ont émergé dans le domaine de l'anthropologie médico-légale. Certains peuvent être en lien avec la microstructure architecturale osseuse (épaisseur trabéculaire, degré d'anisotropie...) (Bouxsein, 2010 ; Wade, 2011) ou bien concerner plus directement la densité minérale de l'os en certaines zones anatomiques (Castillo, 2011 ; Paschall, 2018 ; Navega, 2018). Il semble donc pertinent d'approfondir sur l'apport que peut constituer ce paramètre en anthropologie médico-légale.

I-2. La densité minérale osseuse (DMO) en anthropologie médico-légale

I-2.1. La DMO et le dimorphisme sexuel

Il est important de caractériser les différents types de DMO décrits dans la littérature. En pratique, l'absorptiométrie biphotonique aux rayons X (DXA) est la technique de référence pour la mesure de la DMO. Ces appareils mesurent le contenu minéral osseux (hydroxyapatite) rapporté à une surface, il s'agit donc d'une densité surfacique (exprimée en g/cm²). Il existe également des méthodes volumiques plus élaborées qui utilisent de l'imagerie tomodensitométrique appelée QCT (*Quantitative Computed Tomography*) afin de mesurer une densité osseuse volumique (exprimée en g/cm³) (Cormier, 1998).

La densité osseuse surfacique va évoluer en fonction de la taille de l'os tandis que la densité osseuse volumique va dépendre de la quantité d'os au sein de l'enveloppe périostée (Seeman, 2001 ; Van Der Sluis, 2002 ; Cheuk, 2018). Ainsi, lors de la croissance, la taille des os va augmenter de telle sorte que la densité surfacique également, au contraire de la densité osseuse volumique qui va rester constante (Seeman, 2001 ; Van Der Sluis, 2002).

Ces particularités impliquent que la densité osseuse, surfacique ou volumique, ne connaît pas la même évolution chez l'homme et chez la femme. De manière générale, l'os masculin est plus grand que son homologue féminin, ce qui se traduit par une densité osseuse surfacique plus importante (Seeman, 2001). De plus, l'os masculin présente de plus importantes appositions périostées que l'os féminin, la perte osseuse sera donc moins importante et moins rapide que chez la femme (Seeman, 2001).

Parallèlement à ces mécanismes osseux constitutionnels, les facteurs hormonaux sont également des paramètres qui vont intervenir dans l'évolution de la DMO selon le sexe considéré (Wells, 2007 ; Hägg, 2021 ; Yun, 2021). Chez la femme, la perte osseuse débute quelques années avant la ménopause et s'accélère nettement lorsque débute la carence œstrogénique. En effet, l'arrêt brutal à la ménopause de la sécrétion œstrogénique ovarienne est responsable, chez la femme, d'une accélération du remodelage osseux et notamment de la résorption, ayant pour conséquences l'amincissement des corticales et des travées osseuses, ainsi que la perforation des travées et la diminution de leurs connexions. Ces mécanismes expliquent la baisse de la DMO et l'altération de la microarchitecture corticale et trabéculaire. Cette perte osseuse rapide (jusqu'à 2 à 3% par an au rachis) persiste 3 à 5 ans, puis tend à s'atténuer (Cormier, 1998 ; Laroche, 2018). La perte osseuse est plus importante pour les sites squelettiques riches en tissu trabéculaire (Cheuk, 2018).

Chez l'homme, au-delà du rôle fondamental de la carence œstrogénique, la diminution progressive, et non brutale, de la sécrétion androgénique testiculaire liée au vieillissement, explique la perte osseuse trabéculaire linéaire, ainsi qu'une moindre altération de la microarchitecture osseuse et un moindre amincissement des corticales comparativement à la femme (Cheuk, 2018). De manière générale, entre 20 et 80 ans, un homme perd ainsi environ 25% de son capital osseux et une femme 40% (Laroche, 2018).

Ainsi, deux mécanismes essentiels s'associent chronologiquement chez un individu pour expliquer la survenue d'une ostéoporose : l'acquisition d'un pic de masse osseuse faible au cours de la croissance et une perte osseuse accrue à l'âge adulte.

I-2.2. Un paramètre original pour l'estimation de l'âge

Déjà évoquée par les travaux de Todd (1920) au moyen de radiographies du pubis, l'étude du réseau trabéculaire est un très bon reflet de la qualité du tissu osseux, et donc de la tranche d'âge à laquelle est susceptible d'appartenir l'individu en question. A ce jour, plusieurs techniques d'imagerie permettent de caractériser la microarchitecture d'un tissu osseux : la microtomographie X (microCT), la microIRM ou le synchrotron (Chappard, 2010).

D'un point de vue structurel, le tissu trabéculaire est constitué par un ensemble de travées (plaques et piliers) dont la répartition spatiale est hautement anisotrope : les travées se disposent parallèlement à la résultante des lignes de contrainte (Loi de Wolff) (Chappard, 2010). Au fil de l'âge, ces trabécules apparaissent plus épais, moins nombreux et fortement orientés médio-latéralement. Afin de suivre l'évolution des mécanismes de modelage et remodelage, une analyse fine de plusieurs indicateurs architecturaux a été proposée par certains auteurs (Bouxsein, 2010 ; Vilayphiou, 2010 ; Le Garff, 2016) : le facteur de structure trabéculaire (TbPf), la densité de connectivité (ConnD) ou encore l'indice de modélisation de structure (SMI).

Outre sa microarchitecture, la valeur biomécanique du matériau osseux dépend également de son volume et de sa densité. Plusieurs études ont mis en avant ces dernières années le fait que la DMO pouvait être utile pour estimer l'âge d'un individu (Castillo, 2011 ; Paschall, 2018 ; Navega, 2018). Castillo et al. ont notamment été parmi les premiers à souligner la pertinence de la DMO sur la prédiction de l'âge au décès, particulièrement au niveau de l'extrémité proximale du fémur, en contexte médico-légal sur une population d'individus espagnols. Plus récemment, à partir d'un échantillon d'individus portugais, l'étude de Navega et al. a permis de développer une application en ligne appelée *DXAGE* permettant de calculer l'âge au décès à partir des données de densité osseuse.

L'utilisation de la DMO pour l'estimation de l'âge semble se heurter à une question méthodologique fondamentale qui est celle de l'unité de mesure à utiliser. En effet, bien que la technique de référence, à savoir l'absorptiométrie biphotonique, utilise une unité de densité osseuse surfacique (g/cm^2), la prise en compte des valeurs brutes de densité osseuse, exprimées en unités Hounsfield (HU) et dépendantes des paramètres d'acquisition des images scanographiques, se doit d'être étudiée afin d'en analyser la pertinence dans l'estimation de l'âge d'un individu.

Ainsi, il nous a semblé pertinent de nous questionner sur l'apport de la mesure de la DMO pour estimer l'âge sur un échantillon d'individus français, sur l'approche méthodologique à définir lors de son utilisation en pratique et sur son intérêt potentiel à l'associer à la méthode de Brooks et Suchey pour en améliorer la fiabilité.

I-3. Problématiques et objectifs

Les questions posées et les objectifs visés à l'origine de ce travail sont les suivants :

- ✓ Question 1 : la mesure de la DMO par tomodensitométrie peut-elle aider à améliorer l'estimation de l'âge notamment lors de l'utilisation de la méthode de Brooks et Suchey ?
Objectif 1 : tester la faisabilité de la méthode par l'analyse de la corrélation entre DMO, âge et stades de Brooks et Suchey à partir d'un échantillon d'individus français contemporains ayant bénéficié d'examens tomodensitométriques cliniques.
- ✓ Question 2 : la normalisation de la DMO en densité surfacique/volumique est-elle une étape indispensable pour son utilisation dans l'estimation de l'âge d'un individu ?
Objectif 2 : comparer la fiabilité de l'estimation de l'âge selon le type de mesure de densité utilisé (densité surfacique/volumique vs HU) à partir d'un échantillon d'individus français contemporains.
- ✓ Question 3 : la méthode d'estimation de l'âge par la mesure de la DMO est-elle extrapolable en contexte post-mortem ?
Objectif 3 : tester la variabilité de la mesure de la DMO entre des examens tomodensitométriques cliniques et en contexte post-mortem.
- ✓ Question 4 : une méthode combinée incluant la mesure de la DMO et le système de Brooks et Suchey pourrait-elle permettre d'améliorer la précision de l'estimation de l'âge ?
Objectif 4 : tester la fiabilité d'une procédure d'estimation de l'âge couplant la DMO et la méthode de Brooks et Suchey sur des échantillons d'individus français contemporains ayant bénéficié d'examens tomodensitométriques cliniques.

II- Corrélation entre la DMO et l'âge

Question 1 : la mesure de la DMO par tomodensitométrie peut-elle aider à améliorer l'estimation de l'âge notamment lors de l'utilisation de la méthode de Brooks et Suchey ?

Objectif 1 : tester la faisabilité de la méthode par l'analyse de la corrélation entre DMO, âge et stades de Brooks et Suchey à partir d'un échantillon d'individus français contemporains ayant bénéficié d'examens tomodensitométriques cliniques.

Ce chapitre a fait l'objet d'une communication au 51^{ème} Congrès International Francophone de Médecine Légale le 03 juillet 2019 à Dijon¹ et d'un article publié dans la revue *Forensic Science International*² (annexe 1).

II-1. Matériel

II-1.1. L'échantillon

Nous avons réalisé une étude rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques cliniques de symphyse pubienne réalisés au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Toulouse (France) entre novembre 2017 et avril 2018. Les examens tomodensitométriques étaient indiqués dans des contextes d'altération de l'état général ou de pathologies abdominales. L'ensemble des comptes-rendus a été lu et toutes les coupes tomodensitométriques ont été observées à la recherche d'état antérieur susceptible d'interférer avec la mesure de la densité osseuse et l'attribution d'un stade selon la méthode de Brooks et Suchey. Ainsi, les individus ayant des antécédents de maladie osseuse, de traumatisme pelvien ou ceux présentant des matériaux étrangers induisant des artéfacts tels que les arthroplasties de hanche, ont été exclus (figure 1).

Etant donné que les paramètres d'acquisition du scanner étaient différents dans chaque cas, une standardisation des images par un fantôme a été utilisé pour établir et normaliser les valeurs de densité osseuse mesurées pour chaque patient.

Un total de 201 examens tomodensitométriques a été inclus, comprenant 88 individus masculins (âge moyen : 67,4 ans ; âge médian : 68 ans ; âge minimum : 40 ans ; âge maximum : 97 ans ; écart-type : 15,5 ans) et 113 féminins (âge moyen : 65,7 ans ; âge médian : 65 ans ; âge minimum : 40 ans ; âge maximum : 97 ans ; écart-type : 15,6 ans) (figure 2).

¹ Dubourg, O., Faruch-Bilfeld M., Telmon N., Maupoint E., Saint-Martin P., Savall F., 2019. Corrélation entre la densité minérale osseuse du pubis et l'âge d'un individu à partir d'un échantillon scanographique. 51^{ème} Congrès International Francophone de Médecine Légale. Dijon, France.

² Dubourg, O., Faruch-Bilfeld M., Telmon N., Maupoint E., Saint-Martin P., Savall F., 2019. Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample. *Forensic Science International* 298:345-350.



Figure 1 : Exemple d'individu ayant été exclu compte tenu d'antécédents susceptibles d'interférer avec la mesure de la densité osseuse et l'attribution d'un stade selon la méthode de Brooks et Suchey : arthroplastie bilatérale de hanche.

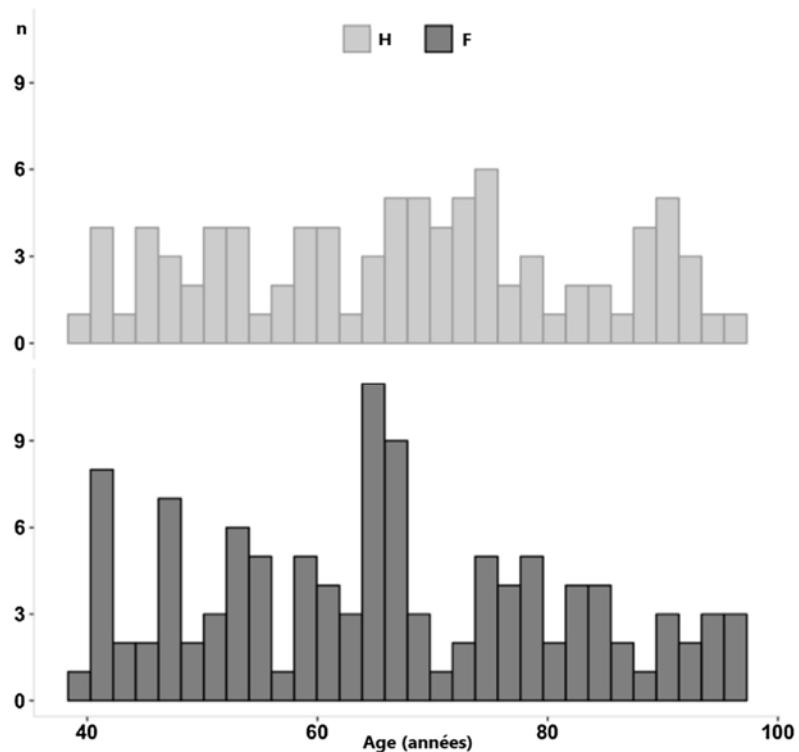


Figure 2 : Histogramme représentant la distribution de l'âge de l'échantillon.

Selon la loi française, les résultats des examens d'imagerie médicale peuvent être utilisés rétrospectivement sans le consentement du patient lorsque ces examens ont été effectués à des fins cliniques et lorsqu'ils ont été enregistrés anonymement (article 40-1, loi 94-548 du 1er juillet 1994). Les données et les images ont été enregistrées de façon anonyme avec uniquement le sexe et l'âge du patient enregistrés au moment de la réalisation de l'examen.

II-1.2. L'acquisition des examens tomodensitométriques

Les images tomodensitométriques ont été obtenues à l'aide du système d'archivage et de communication d'images (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, C.-B., Canada) utilisé par le CHU de Toulouse. Ces examens ont été effectués sur un scanner Optima (General Electrics Medical Systems, Chicago, USA), classiquement utilisé en pratique radiologique quotidienne pour ses hautes performances. La résolution des images était de 512 x 512 pixels. Un filtre de type « tissu mou » a été utilisé. Les reconstructions axiales ont été effectuées tous les 1,25 mm.

La normalisation des valeurs de densité a été réalisée à l'aide du logiciel QCT PRO (Bone Mineral Densitometry Software CT Calibration Phantom, Mindways Software, Austin, USA).

Les images ont été enregistrées au format d'imagerie numérique et de communications en médecine (DICOM).

II-2. Méthode

II-2.1. Mesures de densité et récupération des données

Les images ont été analysées et les mesures réalisées à l'aide du logiciel Osirix Software (Osirix MD 10.0, <https://osirix-viewer.com>). Les valeurs de densité étaient exprimées en HU. Une mesure correspondant à un cercle de 1,6 cm² a été réalisée sur chacune des cinq tiges du fantôme, de la moins radio-opaque (valeur en HU la plus élevée) à la plus radio-opaque (valeur en HU la plus faible). Ces « régions d'intérêt » (ROIs) ont été nommées « ROI1 », « ROI2 », « ROI3 », « ROI4 » et « ROI5 ». Les densités minérales osseuses des différentes tiges du fantôme étaient connues et ont permis de réaliser l'étalonnage (figure 3A).

Les mesures sur le pubis ont été réalisées dans un plan axial, à droite et à gauche. Les ROIs ont été nommés RMR et LMR (respectivement pour « région médiane droite » et « région médiane gauche ») et ont été placés sur les coupes où la surface auriculaire du pubis semblait la plus importante. Les ROIs ont été positionnés au centre de l'os spongieux, sans atteindre l'os cortical (figure 3B).

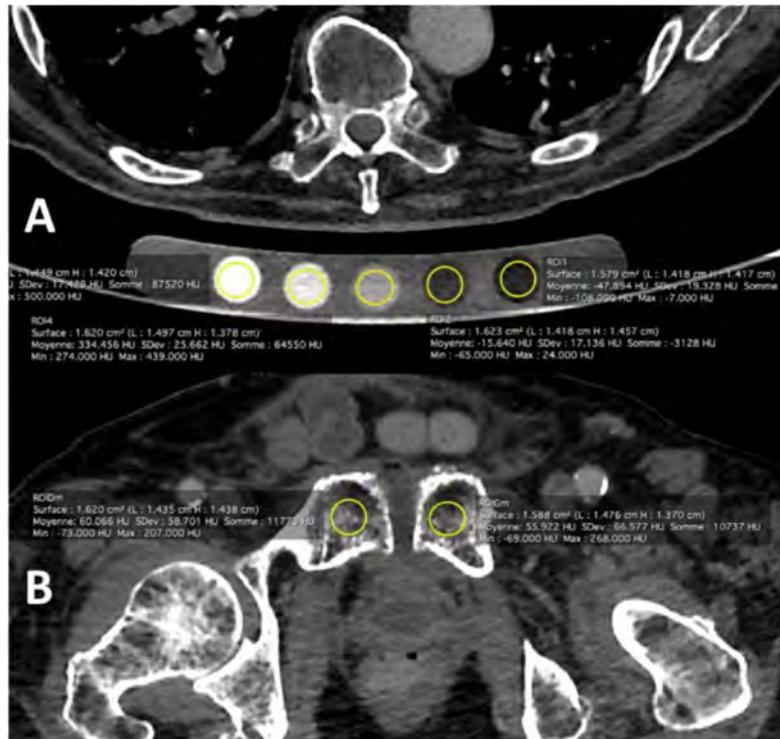


Figure 3 : Positionnement des ROIs sur les tiges du fantôme (A) et à droite et à gauche du pubis (B).

L'étalonnage des mesures a été réalisé en fonction des valeurs des fantômes afin de transformer les valeurs HU en valeurs de densité (en mg/cm³ équivalent aqueux de K₂HPO₄). L'échelle des unités Hounsfield est une relation linéaire de la densité d'un voxel par rapport à la radio-densité de l'eau. Elle est définie par la formule suivante :

$$HU = 1000 \times \frac{\mu_x - \mu_{eau}}{\mu_{eau}}$$

où μ_x est le coefficient d'absorption moyen d'un voxel et μ_{eau} , le coefficient d'absorption de l'eau.

II-2.2. Analyse morphologique en 3D

La surface symphysaire droite a été sélectionnée arbitrairement. L'acquisition et la reconstruction des images en 3D des symphyses pubiennes ont été effectuées à l'aide de la fonction « *Isosurface* » du logiciel Amira (Amira 5.4.2, Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, USA). Les surfaces symphysaires droites ont été isolées et éditées à l'aide des fonctions « *ExtractSurface* » et « *Surface Editor* » (figure 4).



Figure 4 : Acquisition en 3D de la surface symphysaire droite après utilisation des fonctions « *Isosurface* », « *ExtractSurface* » et « *Surface Editor* ».

Un stade a été attribué par deux observateurs pour chaque surface symphysaire selon la méthode proposée par Brooks et Suchey (1990). De plus, pour chacun des six stades, les sous-stades précoce (-1) et tardif (-2) ont été différenciés. Les images ont été analysées sans connaissance de l'âge du sujet et sans ordre préconçu. Les observateurs pouvaient faire pivoter les images dans les trois dimensions. Des captures d'écran de surfaces symphysaires représentatives des 6 stades conformément à la méthode de Brooks et Suchey sont illustrées à la figure 5.

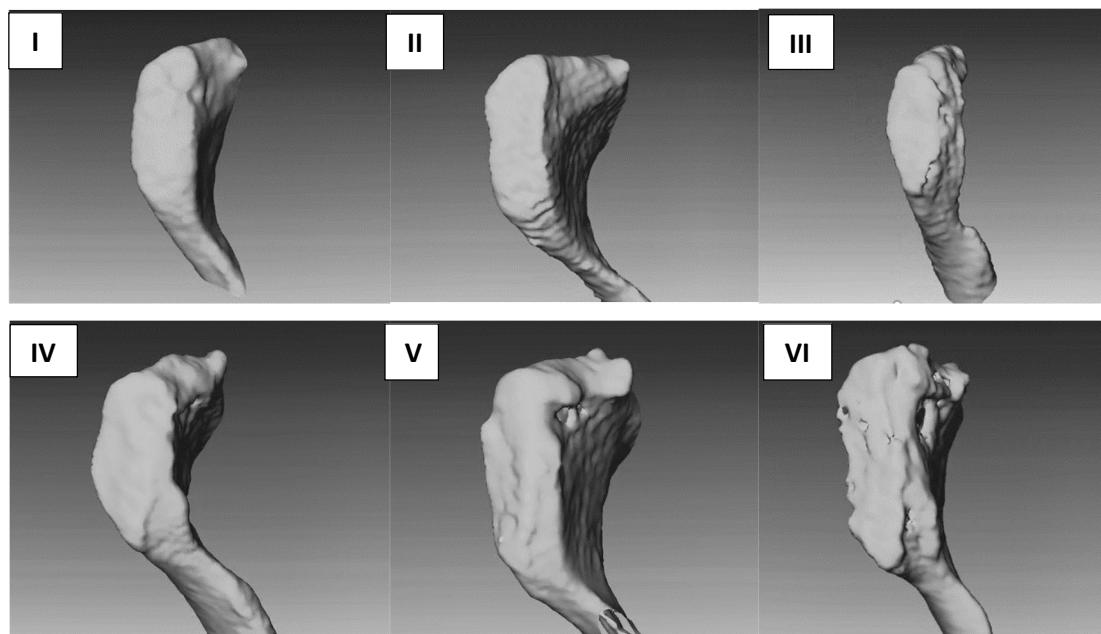


Figure 5 : Surfaces symphysaires droites représentatives des 6 stades selon les critères morphologiques proposés par Brooks et Suchey (1990).

II-3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques et les représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R 3.0.2 (R Development Core Team, 2008).

II-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Concernant les mesures de densité, la variabilité intra- et inter-observateurs a été testée en utilisant le coefficient de corrélation intra-classes sur les valeurs de densité (en mg/cm³) de 25 patients pour les deux sexes. Les patients ont été choisis aléatoirement et les mesures réalisées sur les pubis droits et gauches. La densité des tiges du fantôme n'a été mesurée qu'une seule fois.

II-3.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade

Afin d'étudier les effets de la variabilité intra-observateurs, un premier observateur a effectué une observation de 25 individus de chaque sexe tirés au sort et une deuxième observation de ces mêmes individus un mois après la première. Pour évaluer les effets de la variabilité inter-observateurs, le second observateur a effectué l'observation de ces mêmes 25 individus. Dans chaque cas, les coefficient Kappa de Cohen avec pondération quadratique ont été calculés (Cohen, 1960).

II-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge

Une valeur moyenne de densité osseuse (mBD) a été calculée pour chaque individu puis un calcul de corrélation de Pearson a été réalisé entre l'âge et la mBD pour chaque sexe.

II-3.4. Corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey

En premier lieu, nous avons réalisé des statistiques descriptives pour chaque stade et chaque sexe au moyen d'une analyse de variance (ANOVA) ainsi que pour des stades consécutifs au moyen d'un test de Tukey. La corrélation entre le stade et la mBD a été testée à l'aide de la corrélation de Spearman. Pour une meilleure lisibilité et une pertinence statistique optimale, les stades 4-1 et 4-2 ont été fusionnés en raison de leur faible nombre d'individus les composant.

II-4. Résultats

II-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent avec des valeurs respectives d'ICC de 0,97 ($p<0,0001$) et 0,92 ($p<0,0001$) pour les individus masculins et 0,99 ($p<0,0001$) et 0,96 ($p<0,0001$) pour les individus féminins.

II-4.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade

Les accords intra- et inter-observateurs étaient modérés pour les individus masculins et importants pour les individus féminins. Les valeurs des coefficients Kappa étaient respectivement de 0,72 ($p<0,001$) et 0,65 ($p<0,001$) pour les individus masculins et de 0,93 ($p<0,001$) et 0,86 ($p<0,001$) pour les individus féminins. Les erreurs consistaient principalement en une sur- ou sous-estimation des stades adjacents 4-2/5-1, 5-1/5-2 et 5-2/6-1.

II-4.3. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches

La normalité des valeurs de densité des pubis droits et gauches a été confirmée par un test de Shapiro. Un test de Student a été réalisé afin de confirmer l'absence de différence entre les deux côtés : $t=-0,29$ ($p=0,76$) pour les individus masculins et $t=-0,78$ ($p=0,43$) pour les individus féminins.

II-4.4. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge

Les résultats montraient une corrélation négative statistiquement significative entre l'âge et la mBD pour les individus masculins (coefficient de corrélation $R=-0,62$; coefficient de détermination $R^2=0,38$; $p<0,0001$) et féminins (coefficient de corrélation $R=-0,55$; coefficient de détermination $R^2=0,3$; $p<0,0001$). Les droites de régression ainsi que les intervalles de confiance et de prédiction sont présentés sur la figure 6.

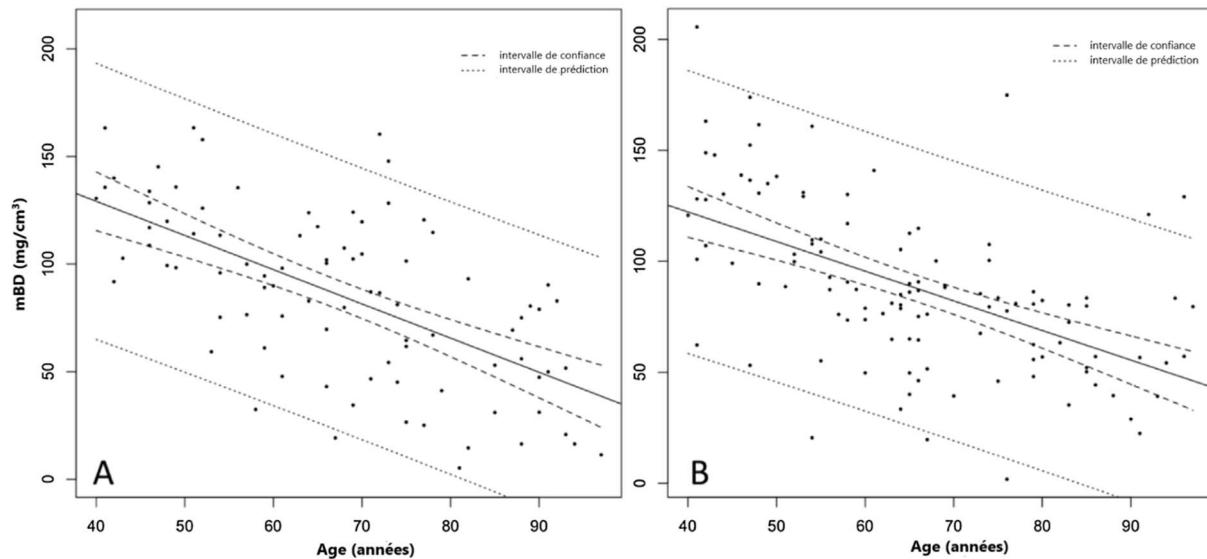


Figure 6 : Nuage de points de la mBD (mg/cm³ équivalent aqueux de K₂HPO₄) en fonction de l'âge pour les individus masculins (A) et féminins (B).

II-4.5. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey

Un test de Tukey a permis d'objectiver une différence statistiquement significative entre les deux stades adjacents 6-1 et 6-2 pour les individus masculins ($p=0,002$) (figure 7).

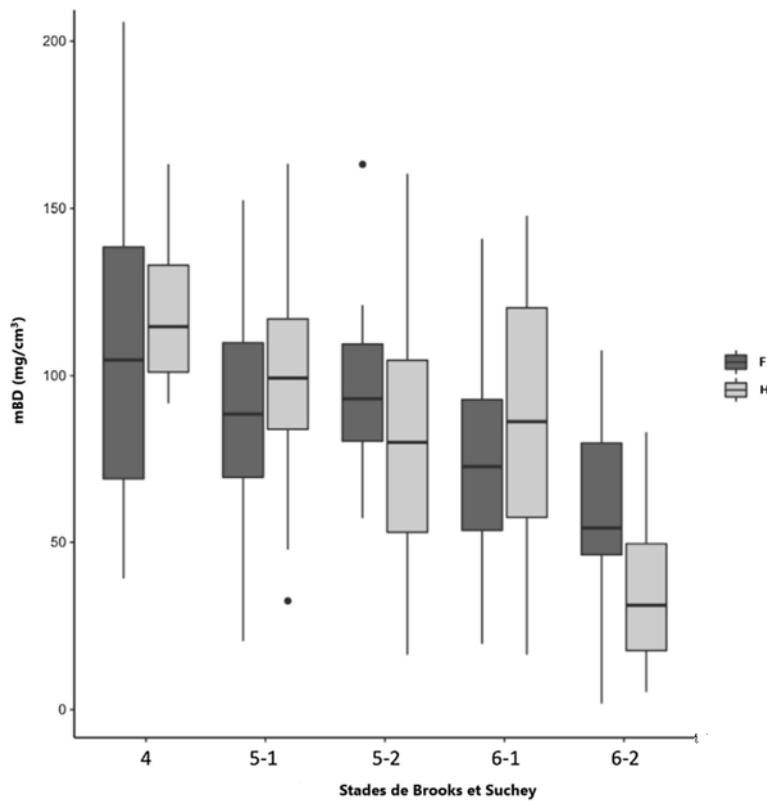


Figure 7 : Diagramme en boîte de la mBD (mg/cm^3 équivalent aqueux de K_2HPO_4) par stade de Brooks et Suchey pour les deux sexes.

De plus, une ANOVA a permis de mettre en évidence une différence statistiquement significative entre le sexe et la mBD pour chaque phase ($p<0,0001$ pour les individus masculins et $p=0,0004$ pour les individus féminins) (tableau 1).

Tableau 1 : Statistiques descriptives.

Stade de Brooks et Suchey	Masculins				Féminins			
	n	mBD (écart-type)	p (test de Tukey)	ANOVA (p)	n	mBD (écart-type)	p (test de Tukey)	ANOVA (p)
4	11	118,6 (22,3)	0,59		20	107,9 (49,5)	0,36	
5-1	23	100,6 (30,5)			47	90,8 (31,9)		
5-2	25	78 (38,1)	0,15	F = 9,69 (< 0,0001)	14	97,4 (26,2)	0,97	F = 5,56 (0,0004)
6-1	18	86,3 (40,5)	0,93		15	77,3 (37,6)	0,54	
6-2	11	37,5 (24,7)	0,002		17	57,3 (25,5)	0,49	

II-5. Discussion

Bien qu'il soit clair que la densité osseuse décroisse avec l'âge, relativement peu d'études ont permis de relier ces modifications de densité à l'estimation de l'âge (Castillo, 2011 ; Curate, 2013 ; Villa, 2013 ; Lopez-Alcaraz, 2015 ; Navega, 2018). Notre travail a révélé une corrélation entre la densité osseuse et l'âge (-0,62 pour les individus masculins et -0,55 pour les individus féminins) globalement en accord avec les données de la littérature (Lopez-Alcaraz, 2015). La différence de corrélation retrouvée entre les deux sexes peut provenir des nombreux changements morphologiques inhérents à la vie d'une femme (facteurs hormonaux, ostéoporose...) ainsi qu'à d'éventuels traumatismes obstétricaux.

Dans notre étude, les accords, notamment inter-observateurs, de la mesure de la densité osseuse étaient bien supérieurs à ceux liés à l'attribution du stade de Brooks et Suchey. A la lumière de la littérature (Telmon, 2005 ; Villa, 2013 ; Lottering, 2013 ; Fleischman, 2013 ; San Millan, 2013), la plupart des erreurs d'estimations retrouvées concernaient des stades avancés (4, 5 et 6). De plus, notre étude a mis en avant une différence spécifique dans la densité osseuse mesurée entre les stades 6-1 et 6-2, notamment pour les individus masculins. Il est donc intéressant de noter que cette densité osseuse pourrait permettre de différencier plus facilement des stades précoce et des stades tardifs dans le système de Brooks et Suchey, notamment sur des individus d'âge avancé.

Les limites de notre étude étaient notamment l'absence de recueil de certaines caractéristiques telles que l'activité physique ou l'origine géographique qui n'étaient pas accessibles dans le compte-rendu des examens tomodensitométriques. De plus, notre échantillon était composé d'individus ayant bénéficié d'un scanner dans un contexte clinique d'altération de l'état général ou de suspicion de pathologies abdominales, ce qui représente un biais de sélection.

Conformément à l'objectif initial fixé, notre étude de faisabilité apporte des résultats particulièrement satisfaisants. D'une part, elle a permis de mettre en évidence la corrélation existante entre la DMO et l'âge, et donc de souligner l'intérêt que pourrait revêtir ce paramètre reproductible et continu qu'est la DMO dans l'estimation de l'âge. Certains auteurs ont d'ailleurs suggéré qu'il pourrait représenter « l'équivalent numérique » de certaines caractéristiques morphologiques de l'os sec telles que la porosité (Baccino, 1999 ; Berg, 2008 ; Rougé-Maillart, 2009 ; Konigsberg, 2008 ; Fanton, 2010 ; Wade, 2011). D'autre part, elle a permis de mettre en lumière l'apport que pourrait constituer la DMO dans l'utilisation du système de Brooks et Suchey, particulièrement pour les âges avancés. A ce titre, il s'agit véritablement de la première étude publiée comparant l'âge et la DMO sur le pubis, les autres travaux s'intéressant préférentiellement à d'autres zones anatomiques telles que le fémur (Castillo, 2011 ; Curate, 2013 ; Navega, 2018 ; Bethard, 2019).

III- Apports méthodologiques de l'utilisation de la DMO

Question 2 : la normalisation de la DMO en densité surfacique/volumique est-elle une étape indispensable pour son utilisation dans l'estimation de l'âge d'un individu ?

Objectif 2: comparer la fiabilité de l'estimation de l'âge selon le type de mesure de densité utilisé (densité surfacique/volumique *vs* HU) à partir d'un échantillon d'individus français contemporains.

Ce chapitre a fait l'objet d'un article publié dans la revue *International Journal of Legal Medicine*³ (annexe 1).

³ Dubourg, O., Faruch-Bilfeld M., Telmon N., Savall F., Saint-Martin P., 2020. Technical note : age estimation by using pubic bone densitometry according to a twofold mode of CT measurement. *International Journal of Legal Medicine* 134(6):2275-2281.

III-1. Matériel

III-1.1. L'échantillon de référence

Nous avons réalisé une étude rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques cliniques de symphyse pubienne réalisés au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Toulouse (France) entre 2015 et 2017. Les examens tomodensitométriques étaient indiqués dans des contextes d'altération de l'état général ou de pathologies abdominales. L'ensemble des comptes-rendus a été lu et toutes les coupes tomodensitométriques ont été observées à la recherche d'état antérieur susceptible d'interférer avec la mesure de la densité osseuse. Ainsi, les individus ayant des antécédents de maladie osseuse, de traumatisme pelvien ou ceux présentant des matériaux étrangers induisant des artefacts tels que les arthroplasties de hanche, ont été exclus. Un total de 400 examens tomodensitométriques a été inclus, comprenant 200 individus masculins (âge moyen : 58,5 ans ; âge médian : 60 ans ; âge minimum : 17 ans ; âge maximum : 94 ans ; écart-type : 17,1 ans) et 200 individus féminins (âge moyen : 62,3 ans ; âge médian : 65 ans ; âge minimum : 15 ans ; âge maximum : 99 ans ; écart-type : 19,2 ans) (figures 8A et 8B).

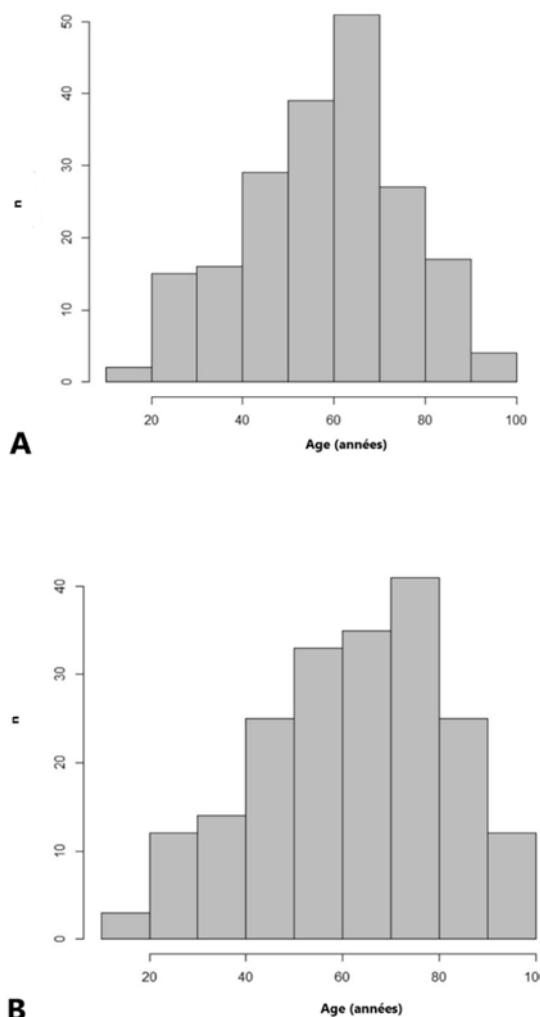


Figure 8 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon de référence (A : individus masculins, B : individus féminins).

III-1.2. L'échantillon test

L'échantillon test a été construit de façon rétrospective et aléatoire à partir d'examens tomodensitométriques cliniques de symphyse pubienne réalisés au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Toulouse (France) en 2018. Un total de 120 examens tomodensitométriques a été enregistré, comprenant 60 individus masculins (âge moyen : 62,4 ans ; âge médian : 61 ans ; âge minimum : 21 ans ; âge maximum : 97 ans) et 60 individus féminins (âge moyen : 51,6 ans ; âge médian : 52,5 ans ; âge minimum : 20 ans ; âge maximum : 94 ans).

Selon la loi française, les résultats des examens d'imagerie médicale peuvent être utilisés rétrospectivement sans le consentement du patient lorsque ces examens ont été effectués à des fins cliniques et lorsqu'ils ont été enregistrés anonymement (article 40-1, loi 94-548 du 1^{er} juillet 1994). Les données et les images ont été enregistrées de façon anonyme avec uniquement le sexe et l'âge du patient enregistrés au moment de la réalisation de l'examen.

III-1.3. L'acquisition des examens tomodensitométriques

L'acquisition des examens tomodensitométriques s'est effectuée de la même manière que celle mentionnée dans les précédents chapitres.

III-2. Méthode

III-2.1. Mesures de densité et récupération des données

Les mesures de densité et la récupération des données ont été effectuées selon le même modèle que celui décrit dans les précédents chapitres. Ainsi, notre étude a permis de mettre en lumière deux types de valeurs de densité osseuse : une première valeur, brute, sans utilisation de fantôme, exprimée en HU ; une seconde valeur, basée sur l'étalonnage des mesures au moyen du fantôme, nommée comme précédemment mBD et exprimée en mg/cm³.

III-2.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques et les représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R 3.0.2 (R Development Core Team, 2008).

III-2.2.a. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Concernant les mesures de densité, la variabilité intra- et inter-observateurs a été testée en utilisant le coefficient de corrélation intra-classes sur les valeurs de densité (en mg/cm³) de 25 patients pour les deux sexes. Les patients ont été choisis aléatoirement et les mesures réalisées sur les pubis droits et gauches.

III-2.2.b. Equations de régression linéaire selon le mode de mesure

Un calcul de corrélation de Pearson a été réalisé entre la densité osseuse (HU et mBD) et l'âge pour chaque sexe. Nous avons ainsi pu produire des équations de régression linéaire selon le mode de mesure de densité et pour chaque sexe.

III-2.2.c. Fiabilité de l'échantillon de référence

La fiabilité a été testée par le calcul de la précision (erreur absolue) et du biais (erreur relative), avant et après étalonnage. La précision permettait d'évaluer l'erreur absolue moyenne tandis que le biais exprimait la tendance à la sur- ou à la sous-estimation de l'âge. Ils se calculent de la façon suivante :

$$\text{Précision (erreur absolue)} = \sum |\text{âge estimé} - \text{âge réel}|/n$$

$$\text{Biais (erreur relative)} = \sum (\text{âge estimé} - \text{âge réel})/n$$

Elle a été déterminée par sexe et par type de valeur de densité (HU ou mBD), selon un « cut-off » d'âge fixé à plus ou moins de 40 ans.

III-3. Résultats

III-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent avec des valeurs respectives d'ICC de 0,96 ($p<0,0001$) et 0,86 ($p<0,0001$) pour les individus masculins et 0,99 ($p<0,0001$) et 0,95 ($p<0,0001$) pour les individus féminins.

III-3.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches

La normalité des valeurs de mBD des pubis droits et gauches a été confirmée par un test de Shapiro. Un test de Student a été réalisé afin de confirmer l'absence de différence entre les deux côtés : $t=-0,1$ ($p=0,91$) pour les individus masculins et $t=-0,3$ ($p=0,75$) pour les individus féminins.

III-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge

Les résultats montraient une corrélation négative statistiquement significative entre l'âge et la mBD pour les individus masculins (coefficient de corrélation $R=-0,54$; coefficient de détermination $R^2=0,3$; $p<2,2\times10^{-16}$) et féminins (coefficient de corrélation $R=-0,61$; coefficient de détermination $R^2=0,37$; $p<2,2\times10^{-16}$). Ces résultats étaient similaires aux corrélations retrouvées entre l'âge et les valeurs de densité en HU, aussi bien pour les individus masculins (coefficient de corrélation $R=-0,59$; coefficient de détermination $R^2=0,35$; $p<2,2\times10^{-16}$) que féminins (coefficient de corrélation $R=-0,69$; coefficient

de détermination $R^2=0,48$; $p<2,2\times 10^{-16}$). Les droites de régression ainsi que les intervalles de confiance et de prédition sont présentés sur les figures 9 (pour les individus masculins) et 10 (pour les individus féminins) ci-dessous.

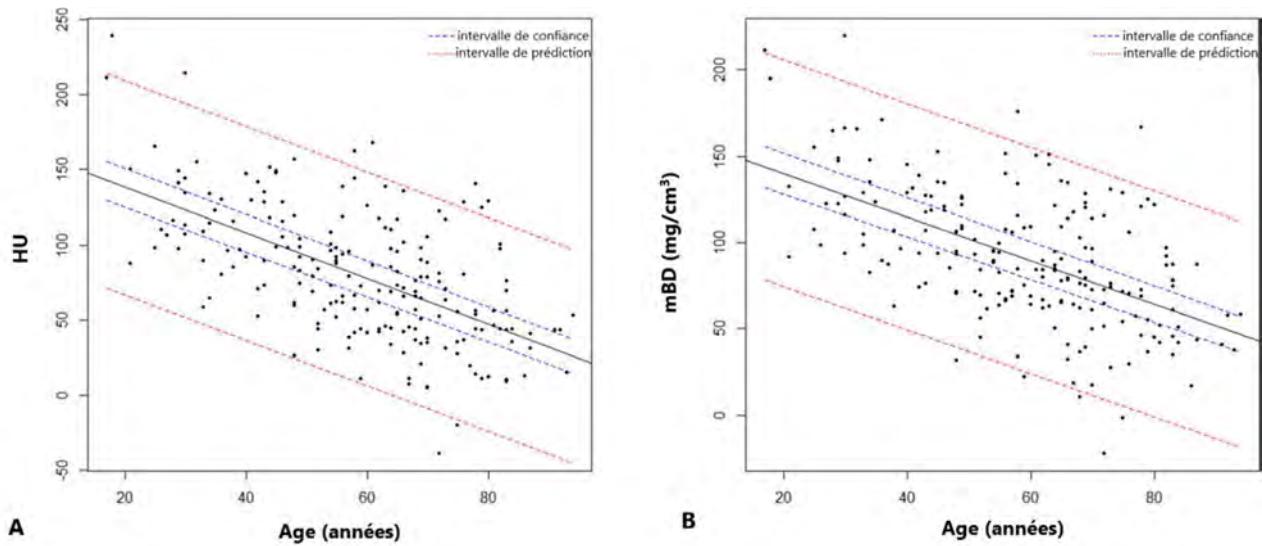


Figure 9 : Nuage de points de la densité en HU (A) et de la mBD (mg/cm³ équivalent aqueux de K₂HPO₄ ; B) en fonction de l'âge pour les individus masculins.

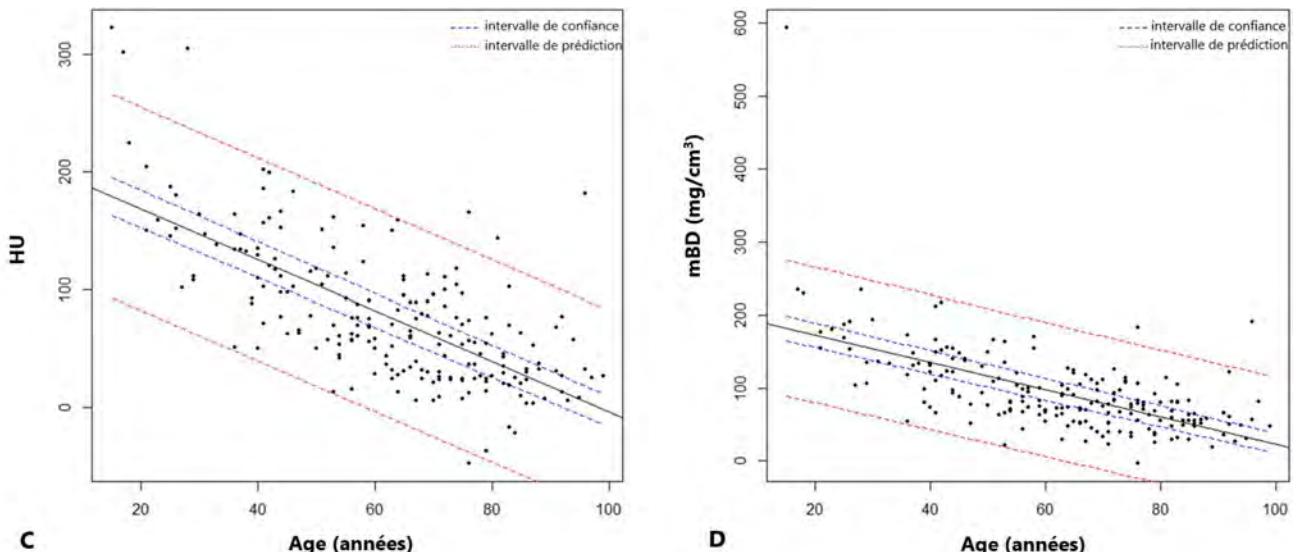


Figure 10 : Nuage de points de la densité en HU (C) et de la mBD (mg/cm³ équivalent aqueux de K₂HPO₄ ; D) en fonction de l'âge pour les individus féminins.

III-3.4. Equations de régression linéaire selon le mode de mesure

Les équations de régression linéaire obtenues sont présentées dans les tableaux 2 (pour les individus masculins) et 3 (pour les individus féminins) ci-dessous. Elles incluent le coefficient de corrélation (R),

le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur d'estimation standard (EES). Elles sont décrites selon le mode de mesure de densité osseuse (avant étalonnage : HU ; après étalonnage : mBD).

Tableau 2 : Equations de régression pour les individus masculins.

	R	R^2	Equation de régression	EES
Avant étalonnage	-0,59	0,35	$HU = -1,51 (\text{âge}) + 168,67$	8,97
Après étalonnage	-0,54	0,3	$mBD = -1,26 (\text{âge}) + 165,28$	8,24

Tableau 3 : Equations de régression pour les individus féminins.

	R	R^2	Equation de régression	EES
Avant étalonnage	-0,69	0,48	$HU = -2,15 (\text{âge}) + 211,67$	10,36
Après étalonnage	-0,61	0,37	$mBD = -1,86 (\text{âge}) + 209,91$	11,06

III-3.5. Fiabilité de l'échantillon de référence

Selon le type de mesure de densité, les précisions (erreurs absolues) et les biais (erreurs relatives) pour les individus âgés de plus ou moins de 40 ans ont été colligés dans les tableaux 4 (pour les individus masculins) et 5 (pour les individus féminins) ci-dessous.

Tableau 4 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins.

Age	n	Avant étalonnage		Après étalonnage	
		Précision	Biais	Précision	Biais
≤ 40	8	7,8	-0,9	7,4	2
> 40	52	9,8	-0,3	11,4	-0,7
Total	60	9,5	-0,4	10,8	-0,3

Tableau 5 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins.

Age	n	Avant étalonnage		Après étalonnage	
		Précision	Biais	Précision	Biais
≤ 40	18	6,9	-1,6	8,2	2,8
> 40	42	7,3	0,7	7,2	-0,06
Total	60	7,1	0,02	7,5	0,75

L'erreur absolue était légèrement plus importante chez les individus masculins âgés de plus de 40 ans que chez ceux âgés de moins de 40 ans, et ce quel que soit le mode de mesure (HU ou mBD). Concernant les individus féminins, l'erreur absolue était sensiblement la même dans tous les groupes. De manière générale, les erreurs relatives étaient très faibles.

III-4. Discussion

Notre étude a mis en évidence une corrélation entre la densité osseuse et l'âge, d'une part sensiblement identique à celle retrouvée lors de l'étude précédente, d'autre part du même ordre de grandeur selon qu'on utilise la valeur de densité en HU ou la mBD. De plus, notre travail renforce le fait que la DMO semble être un critère fiable pour l'estimation de l'âge, à la lumière d'excellents accords intra- et inter-observateurs. L'un des atouts de ce critère est son caractère quantitatif qui nous a ainsi permis d'obtenir des modèles de régression linéaire reliant facilement et « mathématiquement » la densité osseuse à l'âge.

De plus, nous avons objectivé des erreurs absolues homogènes entre les différents groupes, pour la majorité d'entre elles inférieures à 10 ans. Ce résultat est tout à fait prometteur notamment en vue d'une application médico-légale de ce modèle. Certains auteurs avaient jusque-là retrouvé dans leurs modélisations des erreurs absolues supérieures à 10 ans (Castillo, 2011 ; Curate, 2013).

Enfin, nous avons constaté la quasi absence de différence entre les groupes HU et mBD concernant la fiabilité de notre échantillon, quel que soit le sexe et l'âge des sujets. Des études radiologiques antérieures avaient déjà démontré qu'une corrélation très importante existait entre les valeurs de densité avant étalonnage (HU) et après étalonnage (mBD) (Budoff, 2010 et 2013). Ainsi il semblerait suffisant d'utiliser les valeurs brutes de densité (HU), sans nécessité d'utiliser de fantômes, pour relier la DMO à l'âge de l'individu. Cette assertion est en accord avec les travaux menés par Ford et coll. sur 200 scanners abdomino-pelviens pour lesquels les mesures de densité osseuse, réalisées au niveau de l'extrémité proximale du fémur, ont également été documentées en HU (Ford, 2020).

Les principales limites de notre étude étaient les suivantes :

- Comme lors de notre première étude, nous avons utilisé un échantillon d'individus pour lesquels nous n'avons pas recueilli certaines caractéristiques (activité physique, statut socio-économique...) qui auraient pu intervenir dans la prise en compte de nos mesures et de nos résultats statistiques ;
- De plus, bien que l'évolution de la densité osseuse soit bien connue et documentée chez les sujets vivants (cf. Introduction générale), elle l'est beaucoup moins pour les cas post-mortem pour lesquels les phénomènes taphonomiques (actions de l'air ou des gaz de putréfaction) sur les structures osseuses sont loin d'être négligeables (Egger, 2012).

Notre étude a permis, d'une part de confirmer l'importante corrélation qui existe entre la DMO et l'âge des individus, d'autre part de mettre en lumière le fait que la DMO représente un paramètre simple à obtenir par des examens tomodensitométriques et fiable en termes d'estimation de l'âge. De plus, d'un point de vue strictement radiologique, il semblerait que fait d'étailler et de normaliser les valeurs de densité via l'utilisation de fantômes n'apporte pas d'amélioration quant à la fiabilité de l'estimation de l'âge. Ce point est important à relever notamment du fait que les valeurs de densité en HU sont de plus en plus utilisées en pratique à des fins médicales (Zeb, 2012 ; Jang, 2019 ; Zou, 2020).

IV- Applications du modèle sur des échantillons post-mortem

Question 3 : la méthode d'estimation de l'âge par la mesure de la DMO est-elle extrapolable en contexte post-mortem ?

Objectif 3 : tester la variabilité de la mesure de la DMO entre des examens tomodensitométriques cliniques et en contexte post-mortem.

Ce chapitre a fait l'objet d'un co-encadrement et de la rédaction d'un mémoire⁴ par Mme Eulalie Pefferkorn, étudiante en Master 1 Anthropologie à l'Université Paul Sabatier (Toulouse, France).

Afin de mettre en relation les modèles précédents basés sur des scanners de sujets vivants avec les deux échantillons post-mortem décrits ci-après, nous avons été amenés à considérer un facteur important : la dégradation du corps. En effet, les mécanismes de putréfaction entraînent des modifications structurelles importantes sur l'ensemble des tissus. Il était donc nécessaire de prendre en compte dans notre étude l'état d'avancée de la putréfaction, de façon à déterminer si elle influence ou non la valeur de la DMO. Ainsi, nous avons utilisé une échelle permettant de quantifier le degré de putréfaction en fonction de l'importance de l'infiltration de gaz de putréfaction dans les différents tissus : "the Radiological Alteration Index" (RAI) (Egger, 2012).

IV-1. Matériel

IV-1.1. 1^{er} échantillon

Nous avons réalisé une étude rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques réalisés au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Toulouse (France) sur des cadavres en complément d'un examen autopsique sur réquisition effectué à l'Institut Médico-Légal de Toulouse entre 2004 et 2019.

Les victimes non formellement identifiées, âgées de 15 ans et moins, présentant un traumatisme thoracique ou pelvien, ou porteur du matériel ostéosynthétique provoquant des artefacts, ont été exclues.

L'échantillon était composé de 77 individus : 59 hommes (âge minimum : 19 ans ; âge maximum : 93 ans ; âge moyen : 45,5 ans) et 18 femmes (âge minimum : 18 ans ; âge maximum : 88 ans ; âge moyen : 55,6 ans) (figure 11).

⁴ Co-encadrement du mémoire : 50% de support statistique et d'aide à la conception

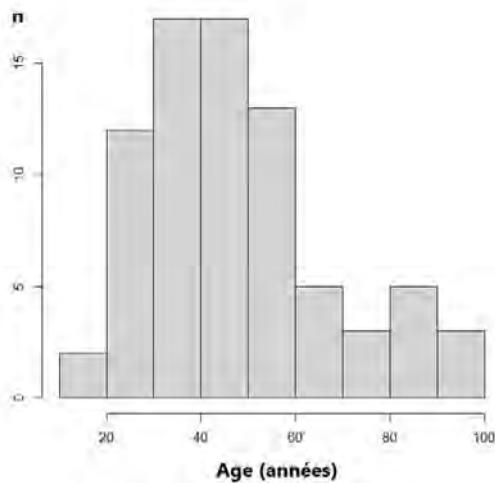


Figure 11 : Histogramme représentant la distribution de l'âge de l'échantillon.

IV-1.2. 2nd échantillon

Le second échantillon est composé d'examens tomodensitométriques réalisés sur des os pubiens “secs”, c'est-à-dire nettoyés de l'ensemble des tissus mous. Ces ossements sont issus d'une collection du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Lyon. Les pubis ont été passés au bain-marie, puis les éléments restants ont été retirés à la main. Les os ont enfin été blanchis à la javel.

Les sujets qui n'étaient pas formellement identifiés ont été exclus.

Un total de 12 examens tomodensitométriques a été enregistré, comprenant 7 individus masculins (âge moyen : 52,1 ans ; âge minimum : 31 ans ; âge maximum : 68 ans) et 5 individus féminins (âge moyen : 69,2 ans ; âge minimum : 61 ans ; âge maximum : 77 ans).

IV-1.3. L'acquisition des examens tomodensitométriques

Concernant le 1^{er} échantillon, l'acquisition des examens tomodensitométriques s'est effectuée de manière similaire à celle mentionnée dans le précédent chapitre.

Concernant le 2nd échantillon, l'appareil utilisé était un Siemens Sensation 16 barrettes spiralées (Siemens, Erlangen, Allemagne) offrant un rendu de haute qualité. Une tension de 120kV et une intensité de 240ms ont été appliquées lors des acquisitions. Chaque session d'image était calibrée pour une acquisition de 16x0.75 mm, avec une épaisseur de coupe de 2 et 0,6 mm. Deux types de filtres de convolution ont été appliqués : un filtre “mou” et un filtre “dur”.

IV-2. Méthode

IV-2.1. Mesures de densité et récupération des données

Dans les deux échantillons, les mesures de densité et la récupération des données ont été effectuées selon le même modèle que celui décrit lors des précédents chapitres. Les valeurs de densité osseuse sont exprimées en HU.

Concernant le 1^{er} échantillon, les images tomodensitométriques ont été obtenues à l'aide du système d'archivage et de communication d'images (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, C.-B., Canada) utilisé par le CHU de Toulouse, avec un filtre de visualisation « os ortho » (figure 12).

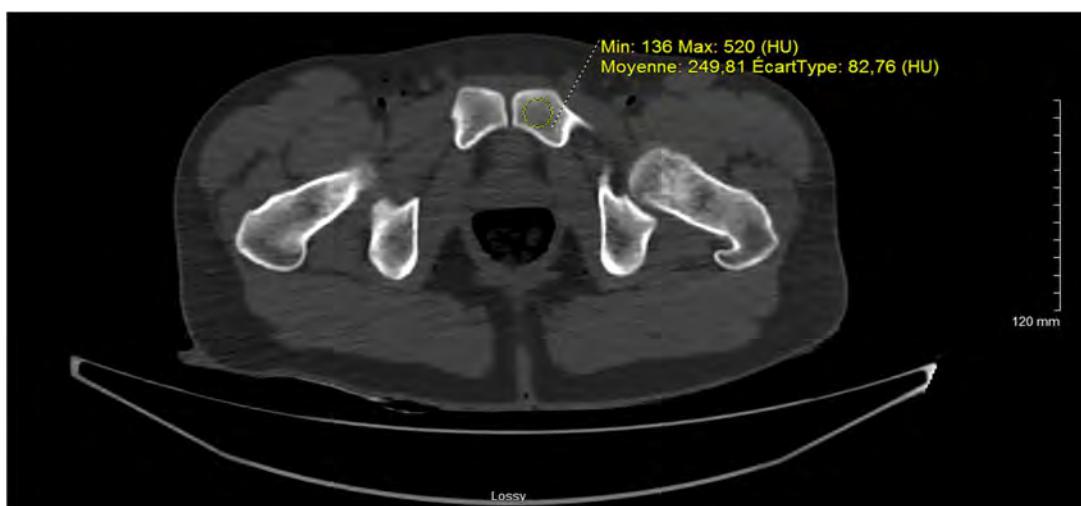


Figure 12 : Exemple de placement de ROI avec mesure de la DMO en HU sur un examen tomodensitométrique de cadavre.

Concernant le 2nd échantillon, le traitement des images a été effectué sur le logiciel Radiant. Nous avons utilisé les acquisitions en filtres “dur”, avec une épaisseur de coupe de 2 mm (Figure 13). En effet, ce mode d'acquisitions est largement utilisé en pratique clinique pour analyser les structures osseuses et présente l'avantage d'avoir une faible variabilité inter-observateurs (Dedouit, 2006).

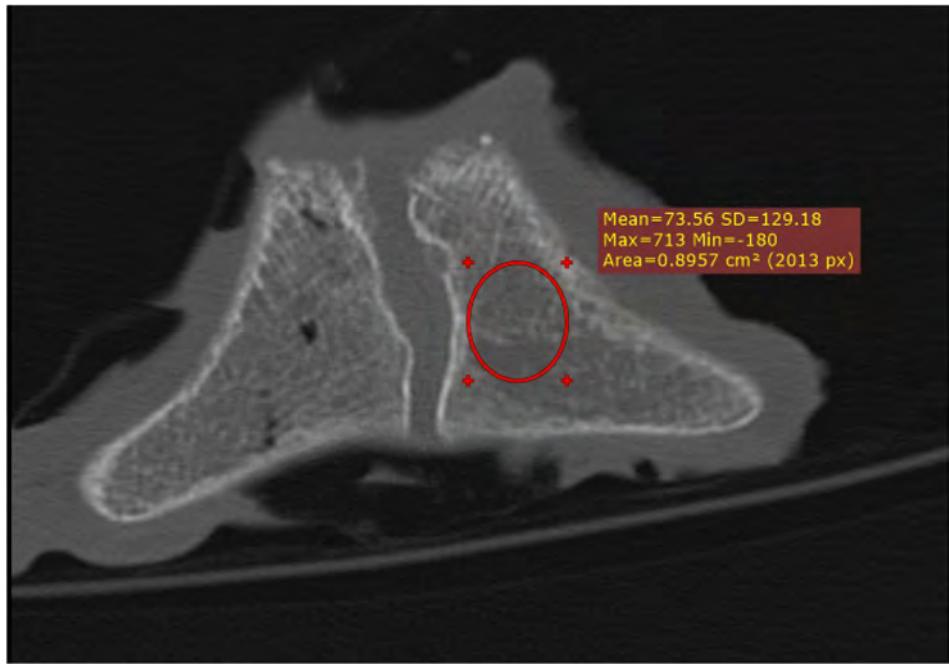


Figure 13 : Exemple de placement de ROI avec mesure de la DMO en HU sur un examen tomodensitométrique d'os sec.

IV-2.2. Mesure de l'index d'altération radiologique (RAI)

Cette mesure a concerné uniquement les examens tomodensitométriques de cadavres. Il s'agit d'une échelle prenant en compte la quantité de gaz infiltrant les tissus afin de quantifier le degré de putréfaction. En effet, le développement et fermentation bactérienne post-mortem, entre autre, entraîne la production de gaz. Ses mécanismes s'accentuent avec l'avancée de la dégradation du corps. La présence d'une quantité importante de gaz dans les tissus témoigne d'un état de putréfaction plus avancée.

Les images tomodensitométriques ont été obtenues à l'aide du système d'archivage et de communication d'images (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, C.-B., Canada) utilisé par le CHU de Toulouse, avec un filtre de visualisation "fenêtre parenchymateuse".

Le RAI a été calculé après classification en 4 grades de l'avancée de l'infiltration gazeuse dans différents tissus. Les zones d'intérêts sont : les cavités cardiaques, le parenchyme hépatique, le tronc veineux brachio-céphalique, l'aorte abdominale, le parenchyme rénal, la vertèbre lombaire L3 et le tissus sous-cutané de la région pectorale. Le grade 0 correspond à l'absence de gaz dans l'organe concerné, le grade III à une infiltration majeure. La classification en grade est réalisée grâce à des photos issues de l'article princeps servant de référence pour chaque site (Figure 14). Ainsi, le grade correspond à une cotation et leur addition permet d'obtenir le RAI (tableau 6), allant de zéro, pour un corps non putréfié, à 100 pour un état de putréfaction très avancé (Egger, 2012).

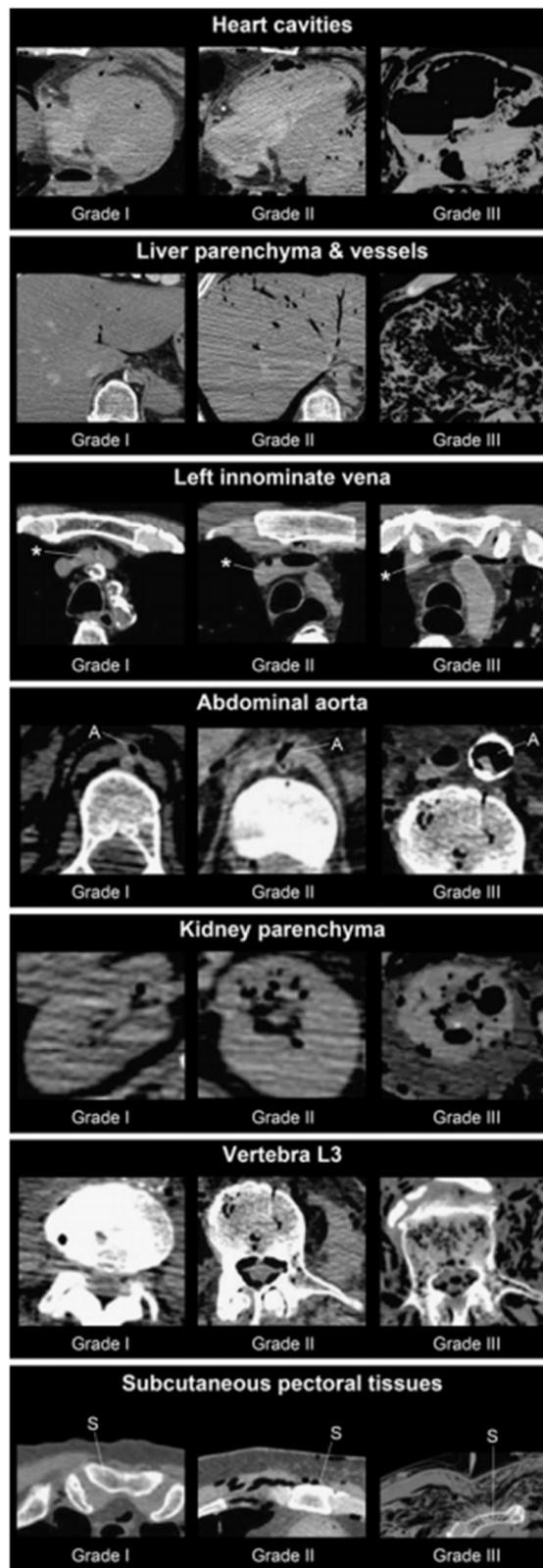


Figure 14 : Echelle visuelle permettant de quantifier l'état de putréfaction.

Tableau 6 : Cotations permettant le calcul des RAI.

Sites	Gas grades	Scores	Reliability Cohen's kappa
Heart cavities	I	1	0.66
	II	8	
	III	17	
Liver parenchyma and vessels	I	1	0.78
	II	5	
	III	20	
Left innominate vena	I	5	0.41
	II	15	
	III	15	
Abdominal aorta	I	8	0.49
	II	8	
	III	8	
Kidney parenchyma	I	0	0.56
	II	7	
	III	7	
Vertebra L3	I	5	0.43
	II	10	
	III	25	
Subcutaneous pectoral tissues	I	8	0.46
	II	8	
	III	8	
RA-index		0-100	ICC=0.95

IV-3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques et les représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R 3.0.2 (R Development Core Team, 2008).

IV-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Concernant les mesures de densité, la variabilité intra- et inter-observateurs a été testée en utilisant le coefficient de corrélation intra-classes sur les valeurs de densité (en HU) de 50 patients pour les deux sexes. Les patients ont été choisis aléatoirement et les mesures réalisées sur les pubis droits et gauches.

IV-3.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches

Aussi bien sur les examens tomodensitométriques de cadavres que de pubis secs, la normalité de la distribution des valeurs de densité osseuse a été confirmée par un test de Shapiro. Nous avons ensuite utilisé un test de Student apparié pour confirmer l'absence de différence significative entre les valeurs des densités osseuses entre les pubis droit et gauche. Ces tests ont été réalisés chez les individus masculins et les individus féminins pour les examens tomodensitométriques de cadavres, et indifféremment du sexe sur les examens tomodensitométriques d'os secs.

IV-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et le RAI

Nous avons réalisé une régression linéaire du RAI en fonction de la densité osseuse (en HU).

IV-3.4. Corrélation entre l'âge et la densité osseuse

Nous avons réalisé une régression linéaire de la densité osseuse (en HU) en fonction de l'âge (en années).

IV-3.5. Estimation de l'âge sur les deux échantillons

Nous avons utilisé l'équation obtenue par la régression linéaire permettant de corrélérer la DMO et l'âge sur les examens tomodensitométriques de cadavres masculins pour estimer l'âge en fonction de la densité osseuse chez ces mêmes individus. Nous avons par la suite réalisé les mêmes tests mais avec les densités osseuses de pubis secs d'individus masculins. Dans les deux échantillons à tester, nous avons effectué un ré-échantillonnage de type « bootstrap » afin d'estimer l'âge de ces individus, ainsi que les valeurs, en années, des erreurs absolues (précision) et relatives (biais).

IV-4. Résultats liés au 1^{er} échantillon

IV-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent avec des valeurs respectives d'ICC de 0,97 ($p<0,0001$) et 0,92 ($p<0,0001$) pour les individus masculins et 0,99 ($p<0,0001$) et 0,96 ($p<0,0001$) pour les individus féminins.

IV-4.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches

Le test de Student permet de confirmer l'absence de différence significative entre les valeurs des densités osseuses entre les pubis droits et gauches chez les hommes ($p = 0,3101$) et les femmes ($p = 0,9588$).

IV-4.3. Corrélation entre la densité osseuse et le RAI

Nous avons réalisé une régression linéaire de la DMO (en HU) en fonction du RAI, qui ne montre pas de corrélation entre ces deux variables :

- chez les individus masculins : $R^2 = 0.0003985$, $p = 0.886$; avec l'équation $HU = 165.33 + 0.07 * RAI$

- chez les individus féminins : $R^2 = 0.0397$, $p = 0.428$; avec l'équation $HU = 150.379 - 1.206 * RAI$

IV-4.4. Corrélation entre l'âge et la densité osseuse

Chez les individus masculins, la corrélation entre la densité osseuse et l'âge a retrouvé un R^2 à 0.4177 ($p < 0,001$).

Elle est représentée par une courbe de linéarité (figure 15). Les bornes bleues représentent l'intervalle de confiance à 95%.

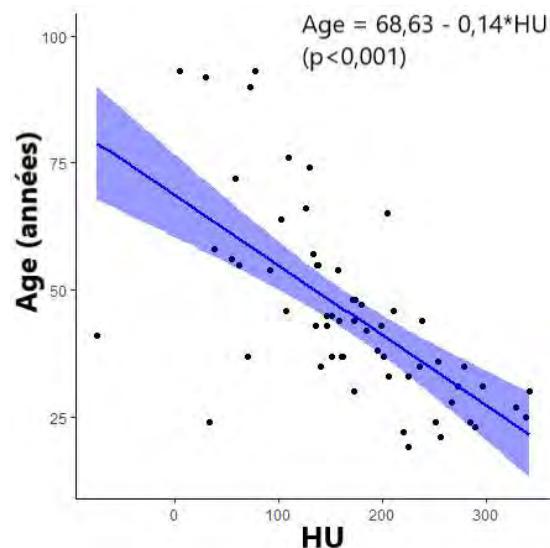


Figure 15 : Droite de régression linéaire représentant l'âge en fonction de la densité osseuse chez les individus masculins.

Chez les individus féminins, il ne semble pas exister de corrélation entre la densité osseuse et l'âge ($R^2 = 0.2324$, $p < 0,00001$). Cependant, le nombre insuffisant de sujets de sexe féminin dans notre population d'étude ne permet pas d'obtenir des analyses statistiques satisfaisantes.

Les statistiques descriptives ainsi que les équations des droites de régression sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Equations de régression.

	R	R ²	Equation
Hommes	-0.6463	0.4177	Age = 68,63-0,14*HU
Femmes	-0,4821	0.2324	Age = 72.71-0.122*HU

IV-4.5. Estimation de l'âge sur les examens tomodensitométriques de cadavres masculins

Nous avons effectué un ré-échantillonnage de type bootstrap afin d'estimer l'âge des individus. L'erreur absolue est de 10.64 ans, l'erreur relative de 0.06 ans.

IV-5. Résultats liés au 2nd échantillon

IV-5.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent avec des valeurs respectives d'ICC de 0,96 ($p<0,0001$) et 0,94 ($p<0,0001$) pour les individus masculins et 0,98 ($p<0,0001$) et 0,99 ($p<0,0001$) pour les individus féminins.

IV-5.2. Comparaison des valeurs de densité entre les pubis droits et gauches

Nous avons donc utilisé un test de Student apparié pour confirmer l'absence de différence significative entre les valeurs des densités osseuses des pubis droit et gauche, indifféremment du sexe ($p = 0.6149$).

IV-5.3. Prédiction de l'âge

Une synthèse des estimations d'âge selon les différentes mesures de densité osseuse est proposée dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Estimation de l'âge en fonction de la DMO de différents sites d'os secs d'individus masculins selon l'équation de régression.

Age réel de l'individu	Age moyen estimé sur la densité osseuse moyenne	Age estimé sur la densité osseuse du pubis droit	Age estimé sur la densité osseuse du pubis gauche
Individu 1	63	37.56	18.64
Individu 2	68	59.65	66.15
Individu 3	56	39.72	50.26
Individu 4	47	56.31	57.46
Individu 5	31	42.37	47.81
Individu 6	66	45.77	53.36
Individu 7	34	52.35	44.32
			60.38

Nous avons pu constater une importante discordance entre les estimations d'âge selon la mesure de la densité osseuse utilisée.

Aucune des trois valeurs de densité osseuse (droite, gauche et moyenne) n'a semblé être plus prédictive de l'âge réel qu'une autre.

IV-6. Discussion

IV-6.1. Autour du 1^{er} échantillon

Les régressions linéaires réalisées n'ont pas montré d'influence du RAI sur les valeurs de DMO chez les hommes, ni chez les femmes. Ces résultats nous ont permis de nous affranchir du RAI comme facteur correcteur dans la recherche statistique d'une corrélation entre la densité osseuse et l'âge au moment du décès sur nos scanners. La prise en compte du RAI dans l'analyse statistique visant à corréler l'âge et la densité osseuse est importante à plus d'un titre lorsqu'il s'agit de travailler en contexte post-mortem. Cette absence d'effet du RAI sur les mesures de DMO peut être expliquée par le fait que le tissu osseux n'est infiltré par les gaz de putréfaction qu'à un stade de putréfaction avancé, qui plus est l'infiltration des structures osseuses en gaz ne semble pas avoir de raison d'en modifier, en tout cas numériquement et jusqu'à un certain point, la masse volumique de l'os.

Villa et coll. ont également mené un travail sur l'estimation de l'âge en utilisant des images tomodensitométriques post-mortem (Villa, 2013). En se basant sur 319 scanners réalisés dans les trois jours suivant le décès et en s'affranchissant de tout stigmate de décomposition, ils ont identifié 4 phases de modifications de l'os trabéculaire sur 2 sites distincts : la surface auriculaire et le pubis. A cet égard, la description de chacune de ces phases apparaît comme la traduction directe et visuelle de la densité osseuse au sein de ces structures. Ils ont pu obtenir une corrélation statistiquement significative très intéressante entre la phase attribuée et l'âge (0,75 pour les hommes et 0,89 pour les femmes).

La prise en compte du délai post-mortem dans la mesure de la densité osseuse a déjà été étudiée dans la littérature. A partir de 401 autopsies médico-légales, Ichioka et coll. ont analysé la densité minérale osseuse de calcanéums par échographie, l'ont corrélée à l'âge et l'ont appliquée à différents délais post-mortem (de 0 à 120 heures) en la comparant à la densité osseuse d'individus vivants (Ichioka, 2020). Leurs résultats sont en accord avec ceux que nous avons mis en évidence en analysant l'influence du RAI sur la mesure de la DMO: d'une part aucune influence des différents délais post-mortem n'a été retrouvée, d'autre part les valeurs de DMO étaient semblables entre les individus vivants et décédés, et n'étaient pas modifiées lorsque le délai post-mortem croissait.

Concernant la corrélation entre l'âge et la densité osseuse, ce travail a permis de mettre en évidence une corrélation notable entre la densité osseuse et l'âge au décès des individus de sexe masculin. Ces résultats sont concordants avec notre étude précédente estimant l'âge en fonction de la densité osseuse sur des scanners cliniques. L'utilisation de ces mesures permet d'estimer l'âge d'un individu avec une précision de 10,6 ans et un biais de 0,06 ans. De précédentes études montrent que l'estimation de l'âge par la méthode de Brooks et Suchey expose à une précision de 20 ans (Savall, 2018), et par une méthode de mesure de la densité osseuse de l'extrémité médiale de clavicule à une précision de 13 ans (Raspaud, 2020). L'utilisation de la DMO au niveau du pubis serait donc plus performante.

Concernant les scanners de cadavres féminins, il n'a pas été retrouvé de corrélation entre les densités osseuses pubiennes et l'âge. Cette discordance entre les hommes et les femmes peut s'expliquer par le nombre peu important d'individus de sexe féminin dans notre échantillon ($n=18$). Une autre hypothèse peut être que la diminution de la DMO, qui se fait de façon régulière et progressive chez l'homme, est soumise à des fluctuations chez la femme. En effet, la perte osseuse est similaire pour les deux sexes jusqu'à 50 ans environ, puis chez la femme, elle s'accélère secondairement aux changements hormonaux consécutifs de la ménopause, avant de se stabiliser de nouveau.

IV-6.2. Autour du 2nd échantillon

Pour estimer l'âge des individus du groupe "pubis secs", nous avons utilisé le modèle des scanners de cadavres. Seuls les pubis des individus masculins ont été testés, devant l'absence de corrélation retrouvée entre l'âge et la DMO chez les individus féminins. Néanmoins, les résultats demeurent peu concluants : les âges estimés sont très différents en fonction des mesures de densité osseuse utilisée (pubis gauche, pubis droit ou densité osseuse moyenne). Une des explications à des résultats aussi hétérogènes peut s'expliquer par une importante variabilité de la densité entre les pubis droits et gauches sur les pubis secs, telle qu'illustrée sur la figure 16.

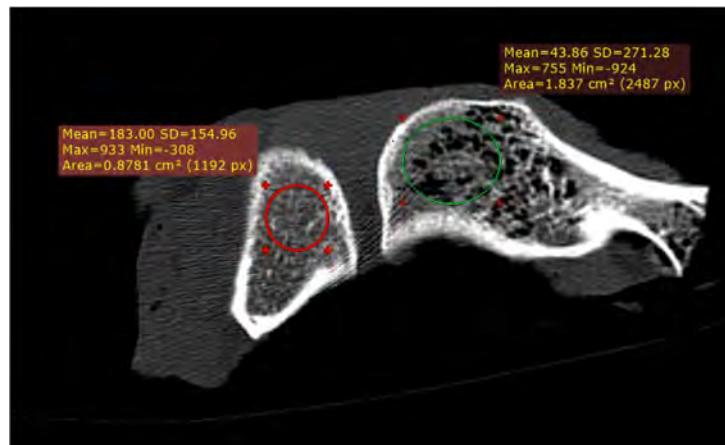


Figure 16 : Illustration de la disparité des valeurs de densité osseuse entre les pubis droits et gauches sur un os sec (à droite : 183 HU, à gauche : 43.86 HU).

Cette variabilité de la densité osseuse en fonction de la latéralité de la mesure sur le pubis est un point primordial à considérer. Dans leur échantillon, Villa et coll. ont attribué leur phase sur les pubis droit et gauche, puis en cas de désaccord la phase la plus grande était alors prise en compte, bien qu'aucune comparaison statistique des âges estimés selon le côté de la mesure réalisée n'ait été effectuée (Villa, 2013).

Enfin, le fait que le test de Student n'ait pas montré de différence significative de densité osseuse selon la latéralisation peut être expliqué par le faible nombre d'individus de notre échantillon "pubis secs" ($n = 12$). Une autre hypothèse à évoquer est qu'il pourrait exister une diminution de la densité osseuse sur des scanners d'os secs, possiblement à cause des traitements subis par les pièces au cours du nettoyage. Il serait donc intéressant de reproduire ce même modèle mais avec un nombre plus important de sujets dans le groupe des os secs, afin de prouver ou non l'absence de corrélation.

IV-6.3. Conclusion

Les limites de notre travail étaient les suivantes :

- Au vu de l'absence de contexte clinique en dehors des causes du décès, notamment des antécédents des individus, nous ne pouvons pas estimer les variations éventuelles de la densité osseuse du pubis en fonction des pathologies connues pouvant entraîner des ostéopénies (ostéoporose, corticothérapie au long cours, perturbations endocriniennes...). L'estimation de l'âge par la mesure de la densité osseuse pourrait gagner en précision en prenant compte de l'influence de ses facteurs intercurrents.

Compte tenu des mécanismes de dégradation du corps, l'absence d'influence de la putréfaction sur la densité osseuse peut paraître surprenante. Des recherches centrées sur des scanners de cadavres à un stade avancé de putréfaction pourraient permettre de conclure de façon plus certaine sur le fait de s'affranchir du RAI dans la détermination de l'âge quel que soit le stade de dégradation du corps.

En synthèse, nous avons pu mettre en évidence la corrélation entre l'âge au décès et les mesures de la densité osseuse du pubis sur des images tomodensitométriques post-mortem de cadavres masculins. Cette méthode, simple d'utilisation, semble donc applicable aux images tomodensitométriques de sujet décédés de sexe masculin, sans qu'il n'existe d'interférence avec les mécanismes de putréfaction. Cette information peut s'avérer utile dans l'estimation de l'âge d'un individu masculin, notamment en anthropologie médico-légale, en post-mortem immédiat.

V- Proposition d'une procédure associant la DMO et la méthode de Brooks et Suchey

Question 4 : une méthode combinée incluant la mesure de la DMO et le système de Brooks et Suchey pourrait-elle permettre d'améliorer la précision de l'estimation de l'âge ?

Objectif 4 : tester la fiabilité d'une procédure d'estimation de l'âge couplant la DMO et la méthode de Brooks et Suchey sur des échantillons d'individus français contemporains ayant bénéficié d'examens tomodensitométriques cliniques.

Ce chapitre a fait l'objet d'un encadrement et de la rédaction d'un mémoire par Mme Agathe Bascou, étudiante en Master 1 Anthropologie à l'Université Paul Sabatier (Toulouse, France), d'une communication au 52^{ème} Congrès International Francophone de Médecine Légale le 24 septembre 2021 à Montpellier⁵ ainsi que d'un article publié dans la revue *International Journal of Legal Medicine*⁶ (annexe 1).

V-1. Matériel

V-1.1. L'échantillon de référence

Nous avons réalisé une étude rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques cliniques de symphyse pubienne réalisés aux Centres Hospitalo-Universitaires (CHU) de Toulouse (France) et de Tours (France) entre janvier 2013 et juillet 2014. Cet échantillon de référence a fait l'objet d'une validation lors d'une précédente publication (Savall, 2018). Les examens tomodensitométriques étaient indiqués dans des contextes d'altération de l'état général ou de pathologies abdominales. L'ensemble des comptes-rendus a été lu et toutes les coupes tomodensitométriques ont été observées à la recherche d'état antérieur susceptible d'interférer avec la mesure de la densité osseuse et l'attribution d'un stade selon la méthode de Brooks et Suchey. Ainsi, les individus ayant des antécédents de maladie osseuse, de traumatisme pelvien ou ceux présentant des matériaux étrangers induisant des artéfacts tels que les arthroplasties de hanche, ont été exclus. Un total de 1099 examens tomodensitométriques a été inclus, comprenant 550 individus masculins (âge moyen : 51 ans ; âge minimum : 15 ans ; âge maximum : 92 ans ; écart-type : 21,5 ans) et 549 féminins (âge moyen : 53,1 ans ; âge minimum : 15 ans ; âge maximum : 100 ans ; écart-type : 22,7 ans) (figure 17).

⁵ Bascou, A., Dubourg, O., Telmon, N., Dedouit, F., Saint-Martin, P., Savall, F., 2021. Estimation tomodensitométrique de l'âge au décès : proposition d'une méthode combinée. 52^{ème} Congrès International Francophone de Médecine Légale. Montpellier, France.

⁶ Bascou, A., Dubourg, O., Telmon, N., Dedouit, F., Saint-Martin, P., Savall, F., 2021. Age estimation based on computed tomography exploration : a combined method. International Journal of Legal Medicine 135:2447-2455.

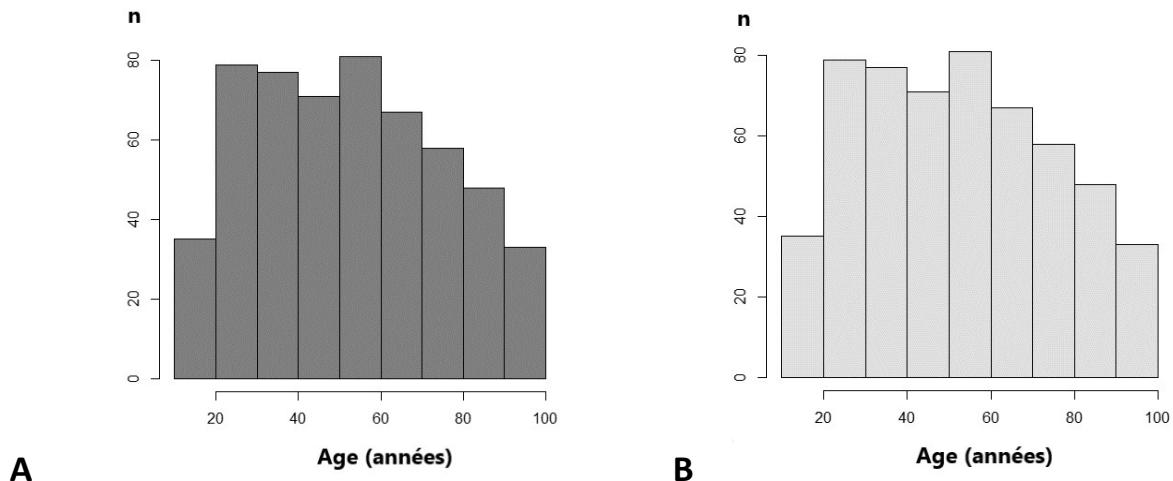


Figure 17 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon de référence (A: individus masculins, B: individus féminins).

Un stade a été attribué par un observateur pour la surface symphysaire gauche (choisie arbitrairement), selon la méthode proposée par Brooks et Suchey (1990).

V-1.2. L'échantillon test

L'échantillon test a été construit de façon rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques cliniques de symphyse pubienne réalisés au Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Toulouse (France) entre novembre 2017 et avril 2018. Un total de 339 examens tomodensitométriques a été enregistré, comprenant 191 individus masculins (âge moyen : 58,6 ans ; âge minimum : 17 ans ; âge maximum : 94 ans ; écart-type : 17,1 ans) et 148 individus féminins (âge moyen : 59,7 ans ; âge minimum : 15 ans ; âge maximum : 99 ans ; écart-type : 19,4 ans) (figure 18).

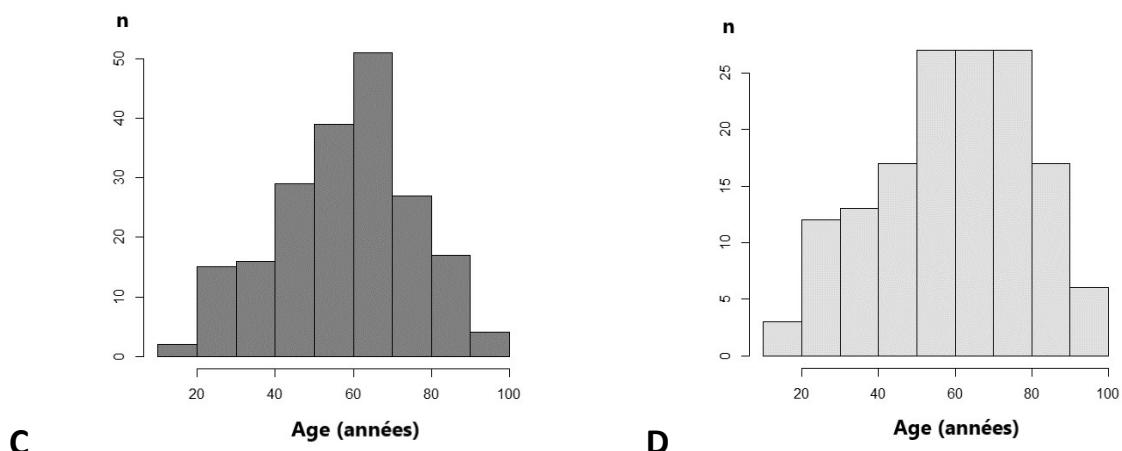


Figure 18 : Histogrammes représentant la distribution de l'âge de l'échantillon test (C: individus masculins, D: individus féminins).

Un stade a été attribué par un autre observateur pour la surface symphysaire gauche (choisie arbitrairement), selon la méthode proposée par Brooks et Suchey (1990).

Considérant le fait que l'estimation de l'âge par la méthode de Brooks et Suchey chez les personnes les plus âgées est peu fiable et marquée par une importante variabilité dans l'appréciation des critères de dégénérescence qui définissent les stades les plus avancés (creusement de la surface symphysaire, « lipping », phénomènes d'érosion et d'ossification), nous avons réalisé un sous-échantillonnage de cet échantillon test permettant ainsi d'avoir les individus de stade 1 à 4 d'un côté et ceux de stade 5 et 6 de l'autre.

V-2. Méthode

V-2.1. L'acquisition des examens tomodensitométriques

L'acquisition des examens tomodensitométriques s'est effectuée de la même manière que celle mentionnée dans le précédent chapitre.

V-2.2. Mesures de densité et récupération des données

Les mesures de densité et la récupération des données ont été effectuées selon le même modèle que celui décrit dans le précédent chapitre.

V-3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques et les représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R 3.0.2 (R Development Core Team, 2008).

V-3.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Concernant les mesures de densité, la variabilité intra- et inter-observateurs a été testée en utilisant le coefficient de corrélation intra-classes sur les valeurs de densité (en HU) de 50 patients pour les deux sexes. Les patients ont été choisis aléatoirement et les mesures réalisées sur les pubis droits et gauches.

V-3.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade

Afin d'étudier les effets de la variabilité intra-observateurs, un premier observateur a effectué une observation de 50 individus de chaque sexe tirés au sort et une deuxième observation de ces mêmes individus trois mois après la première. Pour évaluer les effets de la variabilité inter-observateurs, le

second observateur a effectué l'observation de ces mêmes 50 individus (Savall, 2018). Dans chaque cas, les coefficient Kappa de Cohen avec pondération quadratique ont été calculés (Cohen, 1960).

V-3.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge

Un calcul de corrélation de Pearson a été réalisé entre la densité osseuse (en HU) et l'âge pour chaque sexe. Nous avons ainsi pu produire des équations de régression linéaire entre ces deux paramètres.

V-3.4. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey

Un calcul de corrélation par un test de Kendall a été réalisé entre les mesures de densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey sur les individus issus de l'échantillon de référence.

V-3.5. Fiabilité de l'échantillon de référence selon 3 méthodes d'estimation de l'âge

Nous avons testé 3 méthodes d'estimation de l'âge sur l'échantillon test:

- La méthode de Brooks et Suchey uniquement,
- La méthode de la mesure de la densité osseuse uniquement,
- Une méthode combinée consistant à diviser l'échantillon test en deux sous-échantillons (stades 1 à 4 et stades 5 à 6), puis à utiliser la méthode de Brooks et Suchey pour le 1^{er} sous-échantillon (stades 1 à 4) et la mesure de la densité osseuse pour le 2nd sous-échantillon (stades 5 et 6).

La fiabilité a été testée par le calcul de la précision (erreur absolue) et du biais (erreur relative), selon les mêmes principes que réalisés dans les précédents chapitres.

V-4. Résultats

V-4.1. Variabilité intra- et inter-observateurs de la mesure de la densité

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent avec des valeurs respectives d'ICC de 0,98 ($p<0,0001$) et 0,95 ($p<0,0001$) pour les individus masculins et 0,99 ($p<0,0001$) et 0,97 ($p<0,0001$) pour les individus féminins.

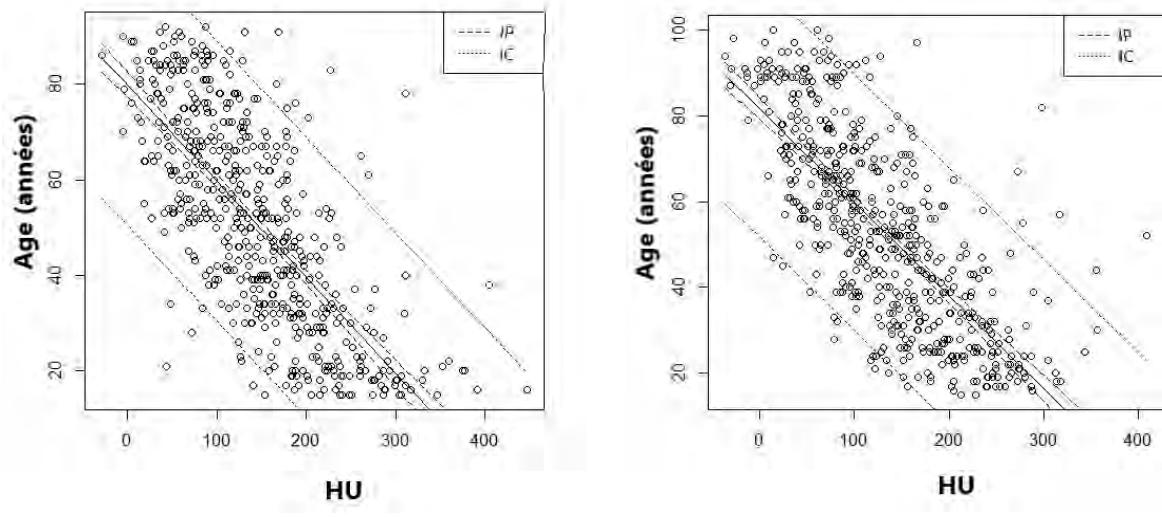
V-4.2. Variabilité intra- et inter-observateurs de l'attribution du stade

Les variabilités intra- et inter-observateurs montraient un accord excellent pour les deux sexes. Les valeurs des coefficients kappa étaient, respectivement pour l'intra- et l'inter-observateurs, de 0,93 ($p <0,001$) et 0,88 ($p <0,001$) pour les individus masculins et de 0,93 ($p <0,001$) et 0,76 ($p <0,001$) pour les individus féminins.

V-4.3. Corrélation entre la densité osseuse et l'âge

Les résultats montraient une corrélation négative statistiquement significative entre l'âge et la densité osseuse pour les individus masculins (coefficient de corrélation $R=-0,72$; coefficient de détermination $R^2=0,52$; $p<0,0001$) et féminins (coefficient de corrélation $R=-0,74$; coefficient de détermination $R^2=0,55$; $p<<0,0001$).

Les droites de régression ainsi que les intervalles de confiance (IC) et de prédiction (IP) sont présentés sur la figure 19 ci-dessous.



A

B

Figure 19 : Droite de régression linéaire représentant l'âge en fonction de la densité osseuse chez les individus masculins (A) et féminins (B).

Ces données statistiques sont résumées ci-dessous, en ayant pris en compte l'échantillon total ainsi que le sous-échantillon des individus de stade 5 et 6 de Brooks et Suchey tel que décrit précédemment.

✓ Régression linéaire stades 1 à 6 :

*Individus masculins : $estimateAge_i = 79,8 - 0,2BD_i$ $R^2=0,52$ $p < 2,2e^{-16}$

*Individus féminins : $estimateAge_i = 81,61 - 0,22BD_i$ $R^2=0,55$ $p < 2,2e^{-1}$

✓ Régression linéaire stades 5 et 6 uniquement :

* Individus masculins : $estimateAge_i = 79,44 - 0,14BD_i$ $R^2=0,28$ $p < 2,2e^{-16}$

* Individus féminins : $estimateAge_i = 83,94 - 0,19BD_i$ $R^2=0,43$ $p < 2,2e^{-16}$

D_i : densité osseuse (HU)

V-4.4. Statistiques descriptives et corrélation entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey

Les statistiques descriptives des individus masculins et féminins (tableau 9) de l'échantillon de référence, en fonction du stade de Brooks et Suchey attribué sont présentées ci-dessous.

Tableau 9 : Statistiques descriptives (individus masculins et féminins).

Stades de Brooks et Suchey	n	Masculins				Féminins				
		Age moyen	Age minimum	Age maximum	Ecart-type	n	Age moyen	Age minimum	Ecart-type	
1	36	16,56	15	20	1,54	19	19,37	15	28	3,67
2	34	20,15	16	34	2,96	33	23,36	17	42	5,96
3	53	33,94	19	69	11,55	58	34,05	18	68	14
4	118	43,59	27	81	12,86	143	46,6	22	81	14,32
5	221	59,96	22	91	15,28	195	59,12	20	98	18,4
6	88	74,77	51	92	12,04	99	79,84	47	100	13,07

Un test de Kendall a permis de mettre en évidence une corrélation négative statistiquement significative entre la densité osseuse et les stades de Brooks et Suchey pour les individus masculins (Coefficient de corrélation Tau = -0,5 ; p<0,0001) et féminins (Coefficient de corrélation Tau = -0,5 ; p<0,0001).

La figure 20 illustre la distribution de la densité osseuse (en HU) pour chaque phase de Brooks et Suchey pour les deux sexes.

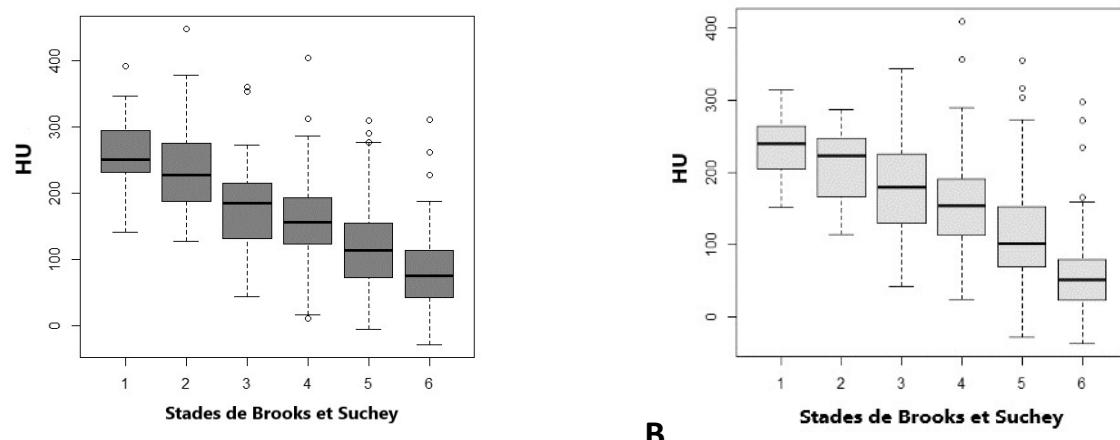


Figure 20 : Diagramme en boîte de la densité osseuse (en HU) par stade de Brooks et Suchey pour les deux sexes (A : individus masculins ; B : individus féminins) dans l'échantillon de référence.

V-4.5. Fiabilité de l'estimation de l'âge

Concernant l'estimation de l'âge par les méthodes distinctes de Brooks et Suchey et de la densité osseuse, les résultats sont présentés dans les tableaux 10 (individus masculins) et 11 (individus féminins) ci-dessous.

Tableau 10 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins par la méthode de Brooks et Suchey et la méthode de la densité osseuse.

Tranches d'âge	Nombre d'individus	Méthode de Brooks et Suchey		Méthode de la densité osseuse	
		Précision	Biais	Précision	Biais
≤34	24	11,02	10,78	25,86	25,86
35-44	19	9,56	8,73	17	17
45-54	31	8,79	-1,73	13,3	13,25
55-64	38	12,36	-7,83	7,4	4,32
65-74	40	16,91	-16,15	6,04	-1,44
75-84	32	20,06	-20,06	9,74	-9,26
≥85	7	21,54	-21,54	18,98	-18,98
Total	191	11,95	5,28	14,23	6,88

Tableau 11 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins par la méthode de Brooks et Suchey et la méthode de la densité osseuse.

Tranches d'âge	Nombre d'individus	Méthode de Brooks et Suchey		Méthode de la densité osseuse	
		Précision	Biais	Précision	Biais
≤34	17	11,94	10,42	20,45	19,71
35-44	22	10,43	8,34	14,01	13,7
45-54	17	7,08	1,31	14,21	9,32
55-64	26	13,3	-3,67	9,05	6,14
65-74	28	12,54	-2,46	6,08	0,07
75-84	24	13,11	-9,96	4,84	-3,79
≥85	14	11,18	-11,18	13,21	-13,21
Total	148	11,8	1,02	10,8	4,54

Par ailleurs, l'estimation de l'âge par la méthode combinée (méthode de Brooks et Suchey pour les stades 1 à 4 et par mesure de la densité osseuse pour les stades 5 et 6) apporte les résultats suivants (tableaux 12 et 13).

Tableau 12 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus masculins par la méthode combinée.

Tranches d'âge	Nombre d'individus	Précision			Biais	
		Moyenne	Maximum	IC 95% ⁷	Moyenne	IC 95% ⁷
≤ 34	24	10,9	29,1	[8,1 ; 13,8]	10,7	[7,7 ; 13,7]
35-44	19	11,2	31,8	[5,1 ; 17,3]	10,4	[4 ; 16,9]
45-54	31	11,7	25,4	[9,2 ; 14,2]	0,9	[-4,2 ; 5,9]
55-64	38	13,1	20,4	[11,5 ; 14,8]	-6,4	[-10,6 ; -2,2]
65-74	40	14,6	29,4	[11,2 ; 18]	-12,1	[-16,4 ; -7,7]
75-84	32	14,4	39,4	[9,5 ; 19,2]	-13,9	[-18,9 ; -8,8]
≥85	7	16,8	25,8	[10,8 ; 22,9]	-16,8	[-22,9 ; -10,8]
Total	191	13,1	39,4	[11,7 ; 14,4]	-4,2	[-6,4 ; -2]

Tableau 13 : Erreurs absolues (précision) et erreurs relatives (biais) pour les individus féminins par la méthode combinée.

Tranches d'âge	Nombre d'individus	Précision			Biais	
		Moyenne	Maximum	IC 95% ⁷	Moyenne	IC 95% ⁷
≤ 34	17	11,9	25,2	[7,8 ; 16,1]	10,4	[5,2 ; 15,6]
35-44	22	9,2	28,2	[6,2 ; 14,7]	7,1	[3,2 ; 13,5]
45-54	17	8,2	26,7	[3,1 ; 11,1]	2,4	[-4,1 ; 6,7]
55-64	26	13,5	29	[9,3 ; 15,5]	-1,4	[-8,6 ; 3,1]
65-74	28	10,5	25,8	[10,5 ; 14,6]	-0,5	[-7,7 ; 2,8]
75-84	24	9,3	35,8	[6,5 ; 17,6]	-6,8	[-15,5 ; -2,3]
≥85	14	10,2	22,4	[7,6 ; 14,8]	-10,2	[-14,8 ; -7,6]
Total	148	10,5	35,8	[9,9 ; 12,7]	0,1	[-3,2 ; 1,5]

V-5. Discussion

A la lumière des résultats obtenus dans notre travail précédent, nous avons retrouvé ici une très bonne corrélation entre la densité osseuse et l'âge (-0,72 pour les individus masculins et -0,74 pour les individus féminins).

Notre travail a mis en évidence une bonne précision sur l'estimation de l'âge par la mesure de la densité osseuse pubienne chez les individus masculins et féminins âgés entre 55 ans et 85 ans avec une erreur absolue variant de 5 à 10 ans. Ces résultats sont probants et confirment une précision similaire voire meilleure que celle retrouvée dans la littérature lors de la mesure de la densité osseuse fémorale. En effet, Navega et coll. ont retrouvé une erreur absolue moyenne de 12 ans

⁷ Intervalle de confiance à 95%

(Navega, 2018) tandis que Curate et coll. ont relevé une erreur absolue variant de 6,2 à 8,8 ans pour des individus âgés de plus de 60 ans (Curate, 2013) et Bethard et coll. une erreur absolue de 15,45 ans pour des individus âgés entre 60 et 69 ans, voire même de 24,44 ans pour des individus âgés entre 70 et 79 ans (Bethard, 2019).

De plus, nous avons mis en évidence de meilleurs résultats par la mesure de la densité osseuse pubienne par rapport à ceux obtenus par la simple utilisation de la méthode de Brooks et Suchey où l'erreur absolue a pu atteindre 21 ans chez les individus masculins âgés de plus de 85 ans. Cette tendance est globalement retrouvée dans la littérature, où Schmitt et coll. ont notamment retrouvé une erreur absolue de 27 ans pour les individus masculins âgés de plus de 60 ans (Schmitt, 2004), ce qui confirme le manque de précision de la méthode de Brooks et Suchey pour les âges avancés.

Contrairement à la plupart des méthodes d'estimation de l'âge où la précision est plus importante chez les jeunes individus (Martrille, 2007; Cunha, 2009), la méthode de la densité osseuse a révélé une très faible précision lorsqu'il s'agissait d'estimer l'âge de sujets jeunes. Dans la littérature, un tel résultat a notamment été retrouvé sur des mesures de densité osseuse au niveau du triangle de Ward (Curate, 2013).

Dans la lignée d'une procédure à deux étapes (*two-step procedure*) telle que proposée par Baccino et al. (2014) en utilisant la méthode de Brooks et Suchey et la méthode de Lamendin (Lamendin, 1988 et 1992) pour les âges avancés, notre travail a permis de mettre la lumière sur l'intérêt de coupler la méthode de la densité osseuse avec celle de Brooks et Suchey pour les individus âgés ayant eu un stade 5 ou 6 de Brooks et Suchey attribué.

En effet, concernant les individus masculins, la méthode combinée a permis d'obtenir une bonne fiabilité sur l'estimation de l'âge chez des individus âgés d'au-moins 55 ans et ayant eu un stade 5 ou 6 attribué (erreur relative s'étalant de 13 à 17 ans), contrairement aux résultats obtenus par la méthode de Brooks et Suchey ou de la densité osseuse utilisées isolément chez les individus très âgés.

Quant aux individus féminins, la tendance est quasi similaire avec une meilleure fiabilité sur l'estimation de l'âge en utilisant la méthode combinée par rapport aux deux autres méthodes, particulièrement pour les sujets âgés de 75 ans et plus où la précision oscillait autour de 9 ans.

En faisant un parallèle avec les résultats obtenus avec la méthode de Lamendin, seule (Lamendin, 1988 et 1992) ou même associée via une « *two-step procedure* » à la méthode de Brooks et Suchey (Martrille, 2007 ; Baccino, 2014), cette dernière semble offrir une meilleure précision pour des âges compris entre 40 et 60 ans (erreurs d'estimation comprises entre 3 et 6 ans), et des résultats sensiblement comparables à notre méthode combinée pour des âges au-delà de 60 ans (erreur d'estimation d'environ 10 ans).

Enfin, à l'instar d'études antérieures l'illustrant (Telmon, 2005; Savall, 2017), nos résultats concernant l'attribution du stade de Brooks et Suchey via les images tomodensitométriques ont également mis en avant l'intérêt d'une approche scanographique quant à la fiabilité de l'estimation de l'âge par cette méthode.

VI- Discussion générale

VI-1. La DMO en contexte médico-légal

VI-1.1. La tomodensitométrie comme technique d'estimation de l'âge

Il est intéressant de noter qu'en effectuant une recherche bibliographique des publications traitant de *forensic anthropology* et dans lesquelles les termes MeSH⁸ *age estimation* et *CT scans*, apparaissent soit dans le titre soit dans le résumé, nous obtenons **22 résultats**, les articles les plus récents datant de 2021 (Fan, 2021 ; Belghith, 2021). En remplaçant *CT scans* par *bone mineral density*, la recherche précédente aboutit à seulement **7 résultats** (Curate, 2013 ; Navega, 2018 ; Paschall, 2018, Botha, 2019 ; Bethard, 2019 ; Ichioka, 2020 ; Ford, 2020). Les supports de mesure de DMO utilisés au sein de ces 7 travaux reposent principalement sur l'échographie (Ichioka, 2020) ou sur la DXA. Seule l'étude de Ford et coll. s'appuie sur des examens tomodensitométriques pour relier la mesure de la densité osseuse au niveau de l'extrémité proximale du fémur à l'estimation du sexe et de l'âge (Ford, 2020).

Ainsi, bien que peu retrouvée dans la littérature, à la lumière des travaux présentés dans ce manuscrit, la tomodensitométrie semble constituer un moyen présentant de nombreux avantages dans l'optique d'estimer l'âge d'un individu via la mesure de la densité osseuse. Plus de 4 millions de tomodensitométries ont été réalisées en France en 2015, dont la plupart sont susceptibles de contenir des informations utiles sur la densité osseuse (Guenoun, 2019). L'exploitation de ces données ne nécessite aucun coût, ni temps du patient, ni équipement, logiciel ou exposition au rayonnement, supplémentaires, et ces données peuvent être acquises rétrospectivement.

VI-1.2. Fiabilité de la méthode en post-mortem

En dépit des excellentes corrélations retrouvées entre la densité osseuse et l'âge, ce paramètre a rarement été utilisé sur des cas post-mortem (Castillo, 2011 ; Curate, 2013 ; Villa, 2013 ; Lopez-Alcaraz, 2015 ; Navega, 2018 ; Botha, 2019 ; Bethard, 2019 ; Ichioka, 2020). Dans ces contextes-là, les altérations taphonomiques, telles que l'action de l'air ou des gaz de putréfaction, sont à prendre en considération dans l'interprétation des mesures de densité osseuse car elles pourraient modifier la structure de l'os trabéculaire par la création de « bulles » (Egger, 2012).

En ayant considéré le RAI au sein de nos travaux (Egger, 2012), nous avons pu constater l'absence d'influence de ce paramètre sur la corrélation entre la densité osseuse et l'âge. Ce point pourrait s'expliquer notamment par le fait qu'il n'y aurait pas nécessairement de raison particulière à ce que la DMO, définie comme étant la quantité de tissu minéralisé par unité de volume, soit modifiée par l'apparition de gaz de putréfaction. Au-delà d'un certain seuil de putréfaction, la création de « bulles » liées à un stade de putréfaction déjà avancé se traduirait radiologiquement par des hypodensités qui induiraient une diminution « factice » de la densité osseuse et donc une possible surestimation de l'âge. Les travaux d'Ichioka et coll. ont notamment pu confirmer l'absence d'influence du délai post-mortem (jusqu'à 120 heures) sur les valeurs de DMO mesurées dans leur échantillon (Ichioka, 2020).

⁸ Medical Subject Headings

Des travaux complémentaires consistant en l'étude de la distribution des grades de RAI par sites anatomiques en fonction du RAI total pourraient être réalisés afin d'étayer cette hypothèse.

De manière générale, l'application de la méthode de la densité osseuse des images tomodensitométriques post-mortem d'individus masculins s'avère concluante, avec une erreur absolue de 10,6 ans et une erreur relative de 0,06 ans. Ce résultat pourra permettre d'augurer une utilisation dans la pratique médico-légale quotidienne, sous réserves de réaliser des travaux complémentaires sur une population plus importante de cadavres d'individus féminins.

En ce qui concerne les os secs, nos résultats sont en revanche peu probants. L'estimation de l'âge des individus est très variable selon la localisation de la mesure de la DMO (droite, gauche ou moyenne) et il convient donc d'être très prudent quant à l'utilisation de cette méthode en pratique dans de tels contextes. Cette importante variabilité de densité entre les pubis droit et gauche peut s'inscrire dans ce phénomène bien décrit dans la littérature qui est l'asymétrie entre les surfaces symphysaires droite et gauche (Hens, 2008 ; Overbury, 2009), rendant ainsi délicate la mise en application de notre méthode sur des os secs. Il convient ainsi d'être vigilant lors de la survenue de telles situations en contexte médico-légal et d'adopter une stratégie statistique en accord avec ce type de problématique, notamment via une approche bayesienne (Savall, 2018).

VI-1.3. Une approche séquentielle de l'estimation de l'âge

Le système de Brooks et Suchey permet de donner des intervalles d'âge en fonction de modifications morphologiques de la symphyse pubienne, classées en six phases (1 à 6). La meilleure précision est apportée pour des individus âgés entre 17 et 40 ans. En effet, le processus de maturation de la symphyse pubienne, qui définit d'ailleurs les phases de la technique de Brooks et Suchey, est relativement long. A la fin de ce processus, ce sont les phénomènes dégénératifs qui prennent le relais. Ces derniers pouvant être très variables d'un individu à un autre, ce qui explique que cette technique soit plus précise lorsqu'elle s'applique à des adultes jeunes ou d'âge moyen plutôt qu'à des individus âgés (Meindl, 1985).

Cette notion de variabilité a été étudiée au sein d'un travail annexe (annexe 2). A travers l'étude de l'accord inter-observateurs et des erreurs d'estimation lors de l'application de la méthode de Brooks et Suchey par trois observateurs d'expérience différente, nous avons notamment pu noter et confirmer que la précision diminuait avec l'âge, illustrée par une sous-estimation croissante de l'âge des individus de 40 ans et plus⁹. Par ailleurs, ces erreurs d'estimation étaient légèrement dépendantes de l'expérience de l'observateur. Ce point avait pu déjà être relevé par l'étude de Martrille et al. (2007) qui confirmait qu'il n'existe aucune méthode précise de détermination de l'âge au-delà de 60 ans.

Afin de pallier à cette imprécision, plusieurs auteurs se sont intéressés à ce thème pour proposer des axes d'amélioration. Nous pouvons notamment citer l'étude de Baccino et al. (2014) qui présente les principes d'une technique appelée « *two-step procedure (TSP)* » pour la détermination de l'âge au décès des adultes. Cette méthode utilise séquentiellement deux techniques : l'utilisation du système de Brooks et Suchey puis l'utilisation de la méthode de Lamendin qui fait appel à l'examen dentaire.

A l'instar de cette procédure en 2 étapes, nous nous sommes questionnés sur la possibilité d'une approche séquentielle de l'estimation de l'âge en couplant la méthode de Brooks et Suchey avec la méthode de la mesure de la densité osseuse. Ainsi, nous pouvons considérer les deux étapes

⁹ Dubourg, O., Toutin R., Bascou A., Jousset N., Telmon N., Saint-Martin P., Savall F., 2020. Inter-observer agreement of the Suchey-Brooks method from a French computed tomography sample. La Revue de Médecine Légale 11:74-80.

suivantes pour optimiser au mieux, au vu des résultats que nous avons obtenus, cette technique. La première étape consiste à observer la symphyse pubienne de manière à établir un pré-choix.

L'estimation de l'âge par la méthode de Brooks et Suchey chez les personnes les plus âgées étant imprécise et marquée par une importante variabilité dans l'appréciation des critères de dégénérescence qui définissent les stades les plus avancés, nous avons fixé comme cut-off le stade 4 en séparant les échantillons d'individus de stade 1 à 4 d'un côté et ceux de stade 5 et 6 de l'autre. Ainsi, lorsqu'un individu est classé dans les phases 1 à 4, l'estimation de l'âge est donnée en utilisant l'intervalle chronologique correspondant à chaque phase de Brooks et Suchey. Si un individu est classé parmi les phases 5 ou 6, la technique de la mesure de la densité osseuse doit alors être utilisée en complément de la méthode de Brooks et Suchey. Cela constitue la deuxième étape. A ce titre, l'ensemble de nos résultats semble clairement montrer une meilleure précision sur l'estimation de l'âge par cette méthode en 2 étapes comparé à la méthode de Brooks et Suchey ou à la méthode de la densité osseuse utilisées isolément, particulièrement pour les individus âgés de 65 ans et plus.

Bien que nous nous soyons principalement focalisés dans l'ensemble de nos travaux à des indicateurs osseux, plus spécifiquement sur la symphyse pubienne, il semble intéressant de constater que la méthode de Lamendin, éventuellement associée elle-même à la méthode de Brooks et Suchey (Martrille, 2007 ; Baccino, 2014), pourrait apporter une meilleure précision dans l'estimation de l'âge pour des individus d'âge compris entre 40 et 60 ans, et une précision comparable pour des âges plus avancés (Lamendin, 1988 et 1992). Il pourrait donc être opportun d'associer dans un travail futur la méthode de Lamendin à notre méthode combinée, assimilable ainsi à une « *three-step procedure* », pour en évaluer les apports sur la précision lors de l'estimation de l'âge.

Enfin, l'ajout d'une septième phase proposé par certains auteurs (Berg, 2004 et 2008 ; Hartnett, 2010) dans la méthode de Brooks et Suchey pourrait permettre d'affiner encore plus l'estimation de l'âge pour ces individus âgés de plus de 60 ans pour lesquels le manque de précision demeure une lacune non négligeable en anthropologie de nos jours. En effet, d'un strict point de vue médico-légal, une réponse à l'autorité judiciaire du type « individu âgé de plus de 50 ans » peut sembler, et à juste titre, suffisamment imprécise pour ne pas occulter l'apport que peut constituer la mesure de la densité osseuse dans ces contextes-là, en dépit d'une variabilité inter-individuelle inéluctable des phénomènes de dégénérescence de la symphyse pubienne.

VI-2. La DMO et ses apports méthodologiques

VI-2.1. Caractéristiques intrinsèques au paramètre

Nos différents travaux détaillés dans ce manuscrit ont tous un dénominateur commun : la corrélation entre la densité osseuse mesurée et l'âge des individus est absolument probante. Elle a notamment atteint -0,72 pour les individus masculins sur notre dernier échantillon. Cunha et al. (2003) ont défini de façon arbitraire une corrélation minimale à 0,9 pour qu'un indicateur d'âge puisse être considéré comme valide. Or, la corrélation la plus importante retrouvée dans la littérature liée à l'estimation de l'âge est de -0,76, dont la mesure de densité est située au niveau du triangle de Ward (Navega, 2018). Nos résultats correspondent globalement à ceux retrouvés dans les études antérieures. Lopez-Alcaraz et al. (2015) ont notamment rapporté une corrélation à -0,6 entre la densité osseuse et l'âge pour les individus masculins.

La mesure de ce paramètre qu'est la densité osseuse afin d'estimer l'âge d'un individu présente plusieurs intérêts :

- Le premier est sa facilité d'accès. En effet, il s'agit d'une mesure facile à obtenir par tomodensitométrie, qui ne requiert pas de reconstructions scanographiques complexes en 3D ;
- Le second est sa reproductibilité. Nous avons sur chacun de nos travaux clairement mis en exergue les excellents accords inter- et intra-observateurs, bien supérieurs à ceux que nous pouvons retrouver lors de l'attribution des stades dans la méthode de Brooks et Suchey.
- Le troisième est son caractère quantitatif. Le caractère continu de la densité osseuse constitue un avantage par rapport aux analyses discrètes que nous pouvons être amenés à utiliser dans diverses méthodes (Todd, 1920 ; Brooks et Suchey, 1990) et dans lesquelles les caractéristiques morphologiques peuvent s'avérer parfois subtiles et difficiles à appréhender (Baccino, 1999 ; Konigsberg, 2008 ; Rougé-Maillart, 2009 ; Fanton, 2010 ; Wade, 2011). De plus, l'utilisation d'un tel critère quantitatif permet de développer des modèles mathématiques de régression linéaire, simple voire multiple, afin de le relier à l'estimation de l'âge.

De plus, la mesure de ce paramètre sur des zones non articulaires telles que le triangle de Ward, la crête iliaque ou le pubis, moins exposées aux contraintes biomécaniques, est un bon reflet des modifications physiologiques structurelles de l'os, notamment de la décroissance de la DMO avec l'âge (Castillo, 2015).

La densité osseuse semble donc constituer un paramètre très utile en termes d'estimation de l'âge et pourrait apparaître comme une sorte « d'équivalent numérique » de certaines caractéristiques osseuses telles que la masse ou la porosité (Berg, 2008).

VI-2.2. Le type de mesure et ses applications cliniques

La DXA, technique de référence pour la mesure de la DMO, présente les caractéristiques suivantes : temps d'examen de quelques minutes, faible coût, projection en deux dimensions, faible irradiation, exactitude de la mesure et reproductibilité satisfaisantes. Elle utilise deux faisceaux de rayons X d'énergie différente et permet la mesure de la DMO en plusieurs sites squelettiques dont le contenu respectif en os cortical et en os trabéculaire est différent (tel que le rachis lombaire et l'extrémité supérieure du fémur, sites de fracture ostéoporotique les plus fréquents).

La densité osseuse moyenne (mBD) telle que décrite dans nos travaux représente le gold standard dans la littérature radiologique et est particulièrement utilisée en pratique, notamment pour quantifier l'ostéoporose.

En parallèle, l'échelle des unités de Hounsfield est une transformation linéaire de la mesure du coefficient d'absorption original dans laquelle la densité de l'eau distillée, aux conditions normales de température et de pression, est définie à zéro HU, tandis que la densité de l'air dans ces mêmes conditions est définie à -1000 HU. Les mesures de radio-densité osseuse en HU lors d'examens tomodensitométriques dits « opportunistes » (Guenoun, 2019) ont retrouvé une sensibilité comparable à la DXA pour détecter la perte de masse osseuse, même si de nombreux facteurs liés aux scanners influent sur la mesure osseuse (modèle, largeur du faisceau collimaté, protocole de balayage...). Ainsi, il semblerait que si la densité est inférieure à 100 HU, le patient aurait un risque élevé d'ostéoporose. D'autres études mettent également en avant l'utilisation des valeurs de densité en HU, notamment sur des situations cliniques de pathologies vertébrales (Zeb, 2012 ; Jang, 2019 ; Zou, 2020).

Toutefois, le fait de considérer ces valeurs en HU implique de prendre en compte les paramètres d'acquisition des images scanographiques. L'originalité d'utiliser des fantômes dans nos travaux était telle que cela permettait de calibrer et de normaliser les valeurs afin d'obtenir des mesures standardisées, quel que soit les paramètres d'acquisition tomodensitométriques. Cependant, plusieurs études ont montré une corrélation très importante entre les valeurs mesurées avec ou sans utilisation de fantômes (Budoff, 2010 et 2013).

Concernant l'estimation de l'âge, nos travaux n'ont pas mis en évidence de différence significative entre le fait d'utiliser les fantômes (mBD) ou non (HU), et ce quel que soit l'âge et le sexe des individus. Ce point renforce l'aspect de la facilité d'accès détaillé dans le chapitre précédent, puisqu'il semblerait qu'en plus d'être une mesure accessible sans difficulté par tomodensitométrie, la densité osseuse mesurée en HU apparaît comme suffisante pour être reliée à l'âge de l'individu avec précision.

VI-3. Perspectives

VI-3.1. Prise en compte de facteurs intercurrents

Au vu de l'absence de contexte clinique (en dehors des critères d'exclusion retenus pour les scanners cliniques et des causes de décès pour les scanners post-mortem), notamment des antécédents de l'individu, nous ne pouvons pas estimer les variations éventuelles de la densité osseuse du pubis en fonction de facteurs généraux (origine ethnique, statut socioéconomique, etc.) ou de pathologies connues pour induire des ostéopénies (ostéoporose, corticothérapie au long cours, perturbations endocriniennes). L'estimation de l'âge par mesures de densité osseuse pourrait ainsi gagner en précision en prenant compte de l'influence de ses facteurs intercurrents (Virtama, 1969 ; Mays, 2015).

A cet égard, Mays a tenté de quantifier et de caractériser l'importance de certains facteurs sur la morphologie osseuse des individus, autres que l'âge. Il a conclu qu'environ 60% des modifications osseuses constatées chez les individus étaient inhérentes à d'autres facteurs que l'âge lui-même (Mays, 2015). A titre d'exemple, les facteurs hormonaux sont très importants à considérer, notamment l'augmentation du taux d'œstrogènes durant la grossesse susceptible d'entraîner une résorption osseuse au niveau du pubis (Putschar, 1976). Les modifications osseuses liées à une activité physique importante peuvent également être notables au niveau de la surface symphysaire et assez similaires aux traumatismes consécutifs à l'accouchement (Wurdinger, 2002). Hackney a notamment relevé une incidence de lésions osseuses de la symphyse pubienne comprise entre 14 et 28% sur un échantillon de joueurs de football (Hackney, 1993).

VI-3.2. Etude d'autres régions anatomiques

En 1923, Todd publiait des mots de prudence selon lesquels « à moins qu'il ne soit absolument inévitable, la symphyse ne doit jamais être utilisée seule ». L'ensemble des travaux réalisés dans ce manuscrit, aussi pertinents puissent-ils être, concernent exclusivement le pubis, et notamment la symphyse. La preuve de l'apport considérable que peut constituer la densité osseuse dans l'estimation de l'âge ne serait être réduite à la simple considération de cette zone anatomique. Plusieurs études ont déjà pris le parti de s'intéresser à d'autres structures anatomiques telles que le col fémoral ou le triangle de Ward (Castillo, 2011 ; Navega, 2018 ; Botha, 2019 ; Ford, 2020) et ont

conclu à des corrélations intéressantes entre la densité osseuse et l'âge des individus de leurs échantillons.

Plus généralement, la bonne pratique dans l'estimation de l'âge est bien entendu d'utiliser autant de méthodes que possible permettant ainsi d'améliorer la précision de l'estimation. A ce titre, la preuve de la supériorité des approches à partir de plusieurs indicateurs osseux n'est plus à faire (Baccino, 1999 ; Lovejoy, 1985b). L'approche en 2 étapes (méthode de Brooks et Suchey puis mesure de la densité osseuse) que nous évoquons dans ce manuscrit en est l'illustration, tout en considérant que la densité osseuse ne serait que la traduction « numérique » d'un indicateur osseux tel que la porosité.

VI-3.3. Etude d'autres supports de mesure

Outre l'ostéodensitométrie, qui utilise les rayons X, et le scanner, qui est le support que nous avons utilisé dans les différents travaux exposés précédemment, d'autres moyens de mesure documentés dans la littérature permettent de mesurer la densité minérale osseuse et de la corrélérer à l'âge d'un individu.

Un des moyens décrits est l'échographie, qui utilise la technique des ondes ultrasonores et qui n'entraîne donc pas d'irradiation susceptible d'être dangereux pour le patient. En mesurant l'atténuation et la vitesse de propagation de ces ondes dans les structures osseuses, il est possible d'en déduire la densité du milieu traversé. Ichioka et coll. ont notamment utilisé cette technique pour déterminer la corrélation entre la DMO mesurée et l'âge chez des individus décédés (Ichioka, 2020). Bien que rapide et facile d'utilisation, il semblerait que cette méthode de mesure de la DMO, et donc d'estimation de l'âge, soit moins précise que les autres techniques plus conventionnelles.

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est également un support de mesure dont plusieurs études se sont fait l'écho pour en souligner l'apport dans la mesure de la DMO (Chang, 2017 ; Jerban, 2019 ; Jones, 2021 ; Liu, 2021), et donc sa possible utilisation pour l'estimation de l'âge. Bien que basée sur un faible échantillon (15 fémurs de personnes décédées), l'étude de Jones et coll. a pu mettre en évidence la plus-value de l'IRM sur la mesure de l'indice de porosité par rapport au scanner (Jones, 2021). En mettant l'accent sur le caractère non-invasif et non-irradiant de l'IRM, Chang et coll. ont également démontré les avantages de l'IRM pour l'étude de la densité et de la microarchitecture osseuse (Chang, 2017), ce qui pourrait en faire à l'avenir un support de référence pour prédire un risque de fracture ou analyser la réponse à un traitement contre l'ostéoporose.

IV-3.4. Estimation du délai post-mortem (DPM)

Au même titre que l'étude de l'évolution architecturale de l'os pourrait s'avérer utile pour approcher le DPM, notamment grâce à la microtomographie et l'étude de diverses variables structurelles (Le Garff, 2016), nous pouvons émettre l'hypothèse que la DMO a également son rôle à jouer dans l'estimation du DPM. Afin d'étayer ces pistes de réflexion et d'envisager des résultats concrets quant à cette problématique scientifique, nos travaux sur des cas post-mortem devront être poursuivis en nous appuyant sur des effectifs plus larges. Là encore, l'utilisation de l'imagerie médicale et bien sûr de la tomodensitométrie, pour la mesure de la DMO aura toute sa place et son intérêt par son caractère non destructeur des pièces osseuses étudiées, à l'inverse de la plupart des méthodes microscopiques nécessitant une préparation avant analyse.

VII- Conclusion

Dans le but d'établir le profil biologique d'un individu, l'estimation de l'âge au décès par l'observation d'indicateurs osseux est probablement le critère le plus complexe à approcher. Le contexte médico-légal dans lequel elle s'inscrit, et qui concerne généralement un seul individu, implique d'avoir une fiabilité et une précision les plus optimales possibles.

Dans cette optique, à travers nos résultats et une revue de la littérature exhaustive, il semble notable que la densité minérale osseuse apporte un certain nombre de satisfactions dans l'estimation de l'âge d'un individu.

A partir d'échantillons d'individus issus de la population française, nos travaux ont permis d'apporter les contributions suivantes :

- Au moyen d'une approche méthodologique originale liée à des mesures réalisées à partir d'examens tomodensitométriques de pubis de sujets vivants, la densité minérale osseuse pourrait aider à améliorer la précision de l'estimation de l'âge et notamment à affiner la méthode de Brooks et Suchey, particulièrement pour des âges avancés.
- Cette méthode, simple d'accès, reproductible et fiable, peut s'appliquer chez le sujet vivant mais également aux sujets décédés, spécifiquement de sexe masculin, sans qu'il ne semble exister d'interférence avec les mécanismes de putréfaction notamment en post-mortem immédiat.
- En revanche, l'utilisation de la densité minérale osseuse pour estimer l'âge dans des contextes de pubis secs a semblé peu pertinente dans notre échantillon. Néanmoins, il conviendrait de reproduire ce même modèle mais avec un nombre plus important de sujets afin de prouver ou non l'absence de corrélation.

Nos travaux ont permis de mettre en lumière l'intérêt de coupler la mesure de la densité osseuse avec la méthode de Brooks et Suchey pour les individus classés en tant "qu'adultes matures", c'est-à-dire ayant eu un stade 5 ou 6 attribué, tranches d'âge pour lesquelles le manque de précision a été décrit et documenté à moult reprises.

En anthropologie médico-légale, les caractéristiques morphologiques du pubis sont souvent étudiées pour estimer l'âge, notamment avec la méthode de Brooks et Suchey. Nos travaux se sont ainsi centrés spécifiquement autour de cette zone anatomique. En outre, il semblerait intéressant à l'avenir de s'attacher à étudier d'autres zones anatomiques telles que les corps vertébraux ou le triangle de Ward en vue de relier la densité minérale osseuse à l'âge. En effet, en plus de présenter un dimorphisme sexuel intéressant, ces sites ont la propriété de soutenir une importante charge liée à la masse corporelle et d'être le siège de nombreux remodelages osseux au fil du temps.

Enfin, il conviendrait de confirmer les résultats obtenus à l'issue de l'ensemble de nos travaux et d'en assurer la robustesse au moyen d'un ou plusieurs autres échantillons tests provenant de populations différentes.

VIII- Références bibliographiques

- Baccino, E., Ubelaker, D.H., Hayek, L.A., 1999. Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. *Journal of Forensic Sciences* 44, 931-936
- Baccino, E., Sinfield, L., Colomb, S., Baum, T.P., Martrille, L., 2014. Technical note : the two-step procedure (TSP) for the determination of age at death of adult human remains in forensic cases. *Forensic Science International* 244, 247-251.
- Belghith, M., Marchand, E., Ben Khelil, M. Rougé-Maillart, C., Blum, A., Martrille, L., 2021. Ages estimation based on the acetabulum using global illumination rendering with computed tomography. *International Journal of Legal Medicine*, doi: 10.1007/s00414-021-02539-6.
- Berg, G.E., 2008. Pubic bone age estimation in adult women. *Journal of Forensic Sciences* 53, 569-577.
- Bethard, J.D., Berger, J.M., Maiers, J. Ross, A.H., 2019. Bone mineral density adult age estimation in forensic anthropology: a test of the DXAGE application. *Journal of Forensic Sciences* 64, 1125-1128.
- Botha, D., Lynnerup, N., Steyn, M., 2019. Age estimation using bone mineral density in South Africans. *Forensic Science International* 297, 307-314.
- Bouxsein, M.L., Boyd, S.K., Christiansen, B.A., 2010. Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography. *Journal of Bone and Mineral Research*. 25(7), 1468-86.
- Brooks, S., Suchey, J.M., 1990. Skeletal age determination based on the os pubis: a comparison of the Acsadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods. *Human Evolution* 5, 227-238.
- Budoff, M., Hamirani, Y.S., Gao, Y.L., 2010. Measurement of thoracic bone mineral density with quantitative CT. *Radiology* 257, 434-440.
- Budoff, M., Malpeso, J.M., Zeb, I., 2013. Measurement of phantomless thoracic bone mineral density on coronary artery calcium CT scans acquired with various CT scanner models. *Radiology* 267, 830-6.
- Castillo, R.F., Ruiz Mdel, C., 2011. Assessment of age and sex by means of DXA bone densitometry: application in forensic anthropology. *Forensic Science International* 209, 53-58.
- Castillo, R.F., Gallegos, R.F., 2015. Study of different involutive changes in bone mineral density measured in Ward's triangle and trabecular volume measured in iliac crest in relation to age. *West Indian Medical Journal* 64(2), 108-112.
- Chang, G., Boone, S., Martel, D., Rajapakse, C.S., Hallyburton, R.S., Valko, M., Honig, S., Regatte, R.R., 2017. MRI assessment of bone structure and microarchitecture. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 46, 323-337.
- Chappard, D. 2010. La microarchitecture du tissu osseux. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 194(8), 1469-1481.
- Cheuk, K.Y., Wang, X.F., Wang, J., Zhang, Z., Ping Yu, F.W., Shan Tam, E.M., Yin Hung, V.W., Wai Lee, W.Y., Ghasem-Zadeh, A., Zebaze, R., Zhu, T.Y., Guo, X.E., Yiu Cheng, J.C., Ping Lam, T., Seeman, E., 2018. Sexual dimorphism in cortical and trabecular bone microstructure appears during puberty in Chinese children. *Journal of Bone and Mineral Research* 33(11), 1948-1955.
- Chiba, F., Makino, Y., Motomura, A., Inokuchi, G., Torimitsu, S., Ishii, N., Kubo, Y., Abe, H., Sakuma, A., Nagasawa, S., Saitoh, H., Yajima, D., Hayakawa, M., Miura, M., Iwase, H., 2014. Age

- estimation by quantitative features of pubic symphysis using multidetector computed tomography. *International Journal of Legal Medicine* 128, 667–673.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20, 37–46.
- Cormier, C., Ruiz, J.C., Thepot, C., 1998. Exploration de la densité minérale osseuse. *Métabolismes-Hormones-Nutrition* 2(6), 12-19.
- Cunha, E., Baccino E., Martrille L., 2009. The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic Science International* 193, 1-13.
- Curate, F., Albuquerque, A., Cunha, E., 2013. Age at death estimation using bone densitometry: testing the Fernandez Castillo and Lopez Ruiz method in two documented skeletal samples from Portugal. *Forensic Science International* 3, 296.
- Dedouit, F., Telmon, N., Costagliola, R., Gainza, D., Otal, P., Joffre, F., Rouge, D., 2006. Utilisation de la tomodensitométrie multi-barrette en anthropologie médico-légale. *Antropo* 11, 85-92.
- Dedouit, F., Savall, F., Mokrane, F-Z., Rousseau, H., Crubézy, E., Rougé, D., Telmon, N., 2014. Virtual anthropology and forensic identification using multidetector CT. *British Journal of Radiology* 87, 20130468.
- Egger, C., Vaucher, P., Doenz, F., 2012. Development and validation of a postmortem radiological alteration index: the RA-Index. *International Journal of Legal Medicine* 126, 559–566.
- Fan, F., Dai, X.H., Zhan, M.J., Li, Y., Zhang, K., Deng, Z.H., 2021. Adult age estimation of CT image reconstruction of the laryngeal cartilages and hyoid bone based on data mining. *Fa Yi Xue Za Zhi* 37(1), 15-20.
- Fanton, L., Gustin, M.P., Paultre, U., 2010. Critical study of observation of the sternal end of the right 4th rib. *Journal of Forensic Sciences* 55, 467-472.
- Fleischman, J.M., 2013. A comparative assessment of the Chen et al. and Suchey-Brooks pubic aging methods on a North American sample. *Journal of Forensic Sciences* 58, 311-323.
- Ford, J.M., Kumm, T.R., Decker, S.J., 2020. An analysis of Hounsfield unit values and volumetrics from computerized tomography of the proximal femur for sex and age estimation. *Journal of Forensic Sciences* 65(2), 591-595.
- Gilbert, B.M., McKern, T.W., 1973. A method for aging the femal Os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 38, 31-38.
- Guenoun, D., Bousson, V., Champsaur, P., Blum, A., 2019. Diagnostic opportuniste de l'ostéoporose. *Société Française de Radiologie*.
- Hackney, R.G., 1993. The sports hernia : a cause of chronic joint pain. *British Journal of Sports Medicine* 27, 58-62.
- Hägg, S., Jylhävä, J., 2021. Sex differences in biological aging with a focus on human studies. *eLife* 10, e63425.
- Hartnett, K.M., 2010. Analysis of age-at-death estimating using data from a new, modern autopsy sample – part I : pubic bone. *Journal of Forensic Sciences* 55, 1145-51.
- Hens, S.M., Rastelli, E., Belcastro, G., 2008. Age Estimation from the Human Os Coxa : A Test on a Documented Italian Collection. *Journal of Forensic Sciences* 53, 1040-1043.

- Ichioka, H., Miyamori, D., Ishikawa, N., Bandou, R., Idota, N., Kondou, H., Ikegaya, H., 2020. Estimation of cadaveric age by ultrasonography. *Diagnostics* 10, 499.
- İşcan, M.Y., Loth, S.R., Wright, R.K., 1984. Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males. *American Journal of Physical Anthropology* 65, 147-156.
- İşcan, M.Y., Steyn, M., 2013. Skeletal Age, in: *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Charles C Thomas Publisher, pp. 59-141.
- Jang, S., Graffy, P.M., Ziemlewicz, T.J., 2019. Opportunistic osteoporosis screening at routine abdominal and thoracic CT: normative L1 trabecular attenuation values in more than 20000 adults. *Radiology* 291, 360-367.
- Jerban, S., Lu, X., Jang, H., Ma, Y., Namiranian, B., Le, N., Li, Y., Chang, E.Y., Du, J., 2019. Significant correlations between human cortical bone mineral density and quantitative susceptibility mapping (QSM) obtained with 3D Cones ultrashort echo time magnetic resonance imaging (UTE-MRI). *Magnetic Resonance Imaging* 62, 104-110.
- Jones, B.C., Jia, S., Lee, H., Feng, A., Shetye, S.S., Batzdorf, A., Shapira, N., Noël, P.B., Pleshko, N., Rajapakse, C.S., 2021. MRI-derived porosity index is associated with whole-bone stiffness and mineral density in human cadaveric femora. *Bone* 143, 115774.
- Katz, D., Suchey, J.M., 1986. Age determination of the male os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 69, 427-435.
- Konigsberg, L.W., Hermann, N.P., Wescott, D.J., 2008. Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death. *Journal of Forensic Sciences* 53, 541-557.
- Lamandin, H., 1988. Age determination with the “simplified” Gustafson method. *Chirurgien Dentiste de France* 58 (427), 43-7.
- Lamandin, H., Baccino, E., Humbert, J.F., Tavernier, J.C., Nossintchouk, R.M., Zerilli, A., 1992. A simple technique for age estimation in adult corpses: the two criteria dental method. *Journal of Forensic Sciences* 37(5), 1373-9.
- Laroche, M., 2018. Chapitre 14 – Ostéoporose. *Rhumatologie pour le praticien*, 169-175.
- Le Garff, E., Mesli, V., Delannoy, Y., Colard, T., De Jonckheere, J., Demondion, X., Hedouin, V., 2016. The precision of micro-tomography in bone taphonomic experiments and the importance of registration. *Forensic Science International* 273, 161-167.
- Liu, L., Kaneko, H., Negishi, Y., Momoeda, M., Arepati, A., Wakana, S., Tomura, J., Someya, Y., Tamura, Y., Watada, H., Kawamori, R., Ishijima, M., 2021. Association between MRI-detected osteophyte formation and bone mineral density in elderly – a cross-sectional analysis using a population-based cohort study “The Bunkyo Health Study”. *Osteoarthritis and Cartilage* 29, S10-S432.
- Lopez-Alcaraz, M., Garamendi Gonzalez, P.M., Aguilera, I.A., 2015. Image analysis of pubic bone for age determination in a computed tomography sample. *International Journal of Legal Medicine* 129, 335-346.
- Lottering, N., MacGregor, D.M., Meredith, M., 2013. Evaluation of the Suchey-Brooks method of age estimation in an Australian subpopulation using computed tomography of the pubic symphysis surface. *American Journal of Physical Anthropology* 150, 386-399.
- Lovejoy, C.O., Meindl, R.S., Pryzbeck, T.R., Mensforth, R.P., 1985a. Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium : a new method for the determination of adult skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology* 68, 15-28.

- Lovejoy, C.O., Meindl, R.S., Mensforth, R.P., Barton, T.J., 1985b. Multifactorial determination of skeletal age at death: a method and blind tests of its accuracy. *American Journal of Physical Anthropology* 68, 1-14.
- Macchiarelli, R., Bonioli, L., 1994. Linear densitometry and digital image processing of proximal femur radiographs: implications for archaeological and forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology* 93, 109–122.
- Martrille, L., Ubelaker, D.H., Cattaneo, C., Seguret, F., Tremblay, M., Baccino, E., 2007. Comparison of four skeletal methods for the estimation of age at death on white and black adults. *Journal of Forensic Sciences* 52(2), 302-307.
- Mays, S., 2015. The effect of factors other than age upon skeletal age indicators in the adult. *Annals of Human Biology* 42, 332–341.
- McKern, T.W., Stewart, T.D., 1957. Skeletal age changes in young American males, Quartermaster Research and Development Command Technical Report, Natick, MA.
- Meindl, R.S., Lovejoy, C.O., 1985a. Ectocranial suture closure : a revised method for the determination of skeletal age at death based on the lateral-anterior sutures. *American Journal of Physical Anthropology* 68, 57-66.
- Meindl, R.S., Lovejoy, C.O., Mensforth, R.P., Walker, R.A., 1985b. A Revised Method of Age Determination Using The Os Pubis, With a Review and Tests of Accuracy of Other Current Methods of Pubic Symphyseal Aging. *American Journal of Physical Anthropology* 68, 29-45.
- Navega, D., Coelho, J.O., Cunha, E., 2018. DXAGE: A new method for age at death estimation based on femoral bone mineral density and artificial neural networks. *Journal of Forensic Sciences* 63, 2.
- Overbury, R.S., Cabo, L.L., Dirkmaat, D.C., Symes, S.A., 2009. Asymmetry of the os pubis: Implications for the Suchey-Brooks method. *American Journal of Physical Anthropology* 139, 261–268.
- Paschall, A., Ross, A.H., 2018. Biological sex variation in bone mineral density in the cranium and femur. *Science Justice* 58(4):287–91.
- Pasquier, E., De Saint Martin Pernot, L., Burdin, V., Mounayer, C., Le Rest, C., Colin, D., Mottier, D., Roux, C., Baccino, E., 1999. Determination of Age at Death: Assessment of an Algorithm of Age Prediction Using Numerical Three-Dimensional CT Data From Pubic Bones. *American Journal of Physical Anthropology* 108, 261–268.
- Poulsen, K., Simonsen, J., 2007. Computed tomography as routine in connection with medico-legal autopsies. *Forensic Science International* 171, 190–197.
- Putschar, W.G.J., 1976. The structure of the human symphysis pubis with special consideration of parturition and its sequelae. *American Journal of Physical Anthropology* 45, 589-594.
- R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.Rproject.org>.
- Rougé-Maillart, C., Vielle, B., Jousset, N., Chappard, D., Telmon, N., Cunha, E., 2009. Development of a method to estimate skeletal age at death in adults using the acetabulum and the auricular surface on a Portuguese population. *Forensic Science International* 188, 91-95.

- San Millan, M., Rissech, C., Turbon, D., 2013. A test of Suchey-Brooks (pubic symphysis) and Buckberry-Chamberlain (auricular surface) methods on an identified Spanish sample: paleodemographic implications. *Journal of Archaeological Sciences* 40, 1743-1751.
- Savall, F., Rérolle, C., Hérin, F., 2016. Reliability of the Suchey-Brooks method for a French contemporary population. *Forensic Science International* 266, 586.
- Savall, F., Hérin, F., Peyron, P.A., 2018. Age estimation at death using pubic bone analysis of a virtual reference sample. *International Journal of Legal Medicine* 609-615.
- Schmitt, A., 2004. Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *International Journal of Osteoarchaeology* 14, 1-6.
- Schratz, D., 1970. Age determination from the internal structure of the humerus. *American Journal of Physical Anthropology* 17, 263–270.
- Schreiber, J.J., Anderson, P.A., Hsu, W.K., 2014. Use of computed tomography for assessing bone mineral density. *Neurosurgery Focus* 37(1):E4. doi:10.3171/2014.5.FOCUS1483.
- Seeman, E., 2001. Sexual dimorphism in skeletal size, density, and strength. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 86(10), 4576-4584.
- Sidler, M., Jackowski, C., Dirnhofer, R., Vock, P., Thali, M., 2007. Use of multislice computed tomography in disaster victim identification—Advantages and limitations. *Forensic Science International* 169, 118–128.
- Suchey, J.M., Katz, D., 1998. Applications of pubic age determination in a forensic setting, in: *Forensic Osteology: Advances in the Identification of Human Remains*. Charles C. Thomas, Springfield, III., U.S.A., pp. 204–236.
- Szilvassy, J., Kritscher, H., 1990. Estimation of chronological age in man based on the spongy structure of long bones, *Anthropologischer Anzeiger* 48, 289–298.
- Telmon, N., Gaston, A., Chemla, P., Blanc, A., Joffre, F., Rouge, D., 2005. Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis. *Journal of Forensic Sciences* 50, 507-512.
- Todd, T.W., 1920. Age changes in the pubic bones, I: the white male pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 3, 285-334.
- Van Der Sluis I.M., De Ridder, M.A.J., Boot, A.M., Krenning, E.P., De Muinck Keizer-Schrama, S.M.P.F., 2002. Reference data for bone density and body composition measured with dual energy x ray absorptiometry in white children and young adults. *Archives of Disease in Childhood* 87, 341-347.
- Vilayphiou, N., 2010. Evaluation de la microarchitecture trabéculaire et des propriétés mécaniques osseuses in vivo chez l'humain par scanner périphérique à haute résolution : application clinique à l'ostéoporose. Médecine humaine et pathologie. Université Claude Bernard – Lyon I. Français. NNT : 2010LYO10317. tel-00730979.
- Villa, C., Hansen, M.N., Buckberry, J., 2013. Forensic age estimation based on the trabecular bone changes on the pelvic bone using post-mortem CT. *Forensic Science International* 233, 393-402.
- Villa, C., Buckberry, J., Cattaneo, C., 2013. Technical note: reliability of Suchey- Brooks and Buckberry-Chamberlain methods on 3D visualizations from CT and laser scans: age estimation methods and 3D visualizations. *American Journal of Physical Anthropology* 151, 158–163.

Villa, C., Buckberry, J., Cattaneo, C., 2015. Quantitative analysis of the morphological changes of the pubic symphysial face and the auricular surface and implications for age at death estimation, *Journal of Forensic Sciences* 60, 556– 565.

Villa, C., Buckberry, J., Lynnerup, N., 2016. Evaluating osteological ageing from digital data, *Journal of Anatomy*, doi:<http://dx.doi.org/10.1111/joa.12544>.

Virtama, P., Helelä, T., 1969. Radiographic measurements of cortical bone : variations in a normal population between 1 and 90 years of age. *Acta Radiologica* 293, 268.

Wade, A., Nelson, A., Garvin, G., 2011. Preliminary radiological assessment of age-related change in the trabecular structure of the human os pubis. *Journal of Forensic Sciences* 56, 312-319.

Walker, R., Lovejoy, C.O., 1985. Radiographic changes in the clavicle and proximal femur and their use in the determination of skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology* 68, 67– 78.

Wells, J.C.K., 2007. Sexual dimorphism of body composition. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism* 21(3), 415-430.

Wurdinger, S., Humsch, K., Reichenbach, J., Peiker, G., Seewald, H.J., Kaiser, W.A., 2002. MRI of the pelvic ring joints postpartum: normal and pathological findings. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 15, 324-329.

Yun, Y., Kim, D., Lee, E.S., 2021. Effect of cross-sex hormones on body composition, bone mineral density, and muscle strength in transwomen. *Journal of Bone Metabolism* 28(1), 59-66.

Zeb, I., Li, D., Nasir, K., 2012. Computed tomography scans in the evaluation of fatty liver disease in a population based study: the multi-ethnic study of atherosclerosis. *Academic Radiology* 19, 811-8.

Zou, D., Muheremu, A., Sun, Z. 2020. Computed tomography Hounsfield unit-based prediction of pedicle screw loosening after surgery for degenerative lumbar spine disease. *Journal of Neurosurgery Spine* 3, 1-6.

IX- Annexes

IX-1. Annexe 1 : Articles publiés à l'origine de ce travail de thèse

Dubourg, O., Faruch-Bilfeld M., Telmon N., Maupoint E., Saint-Martin P., Savall F., 2019. Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample. *Forensic Science International* 298:345-350.

Dubourg, O., Faruch-Bilfeld M., Telmon N., Savall F., Saint-Martin P., 2020. Technical note : age estimation by using pubic bone densitometry according to a twofold mode of CT measurement. *International Journal of Legal Medicine* 134(6):2275-2281.

Bascou, A., Dubourg, O., Telmon, N., Dedouit, F., Saint-Martin, P., Savall, F., 2021. Age estimation based on computed tomography exploration : a combined method. *International Journal of Legal Medicine* 135:2447-2455.



Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample

Olivier Dubourg^{a,b,*}, Marie Faruch-Bilfeld^{a,c}, Norbert Telmon^{a,d}, Estelle Maupoint^d, Pauline Saint-Martin^{a,e}, Frédéric Savall^{a,d}

^aLaboratoire d'Anthropologie Moléculaire et d'Imagerie de Synthèse, Université Toulouse III, AMIS FRE 2960 CNRS, 37 Allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France

^bUNAM, Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire, 4 Rue Larrey, 49933 Angers Cedex 9, France

^cInstitut de L'Appareil Locomoteur, Centre Hospitalier Universitaire de Toulouse, Purpan, Bâtiment Pierre Paul Riquet, Place du Dr Baylac, TSA, 40031, 31059 Toulouse Cedex 9, France

^dService de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire, Rangueil, 1 Avenue du Professeur Jean Poulié, 31059 Toulouse Cedex 9, France

^eInstitut Médico-Légal, Centre Hospitalier Régional Universitaire, 37044 Tours Cedex 9, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 January 2019

Received in revised form 8 March 2019

Accepted 11 March 2019

Available online 16 March 2019

Keywords:

Forensic anthropology

Pubic bone

Suey-Brooks method

Bone mineral density

Aging

ABSTRACT

In forensic anthropology, the estimation of age at death is mainly required to establish a biological profile and facilitate individual identification. The Suey-Brooks (SB) system represents one of the most commonly used and tested methods of assessment based on the morphological characteristics of the pubic symphysis. However, this method has certain drawbacks, including frequently inaccurate estimation for older individuals. The aim of this work was to test the evolution of pubic bone mineral density (BMD) according to age, especially for individuals over 40 years old. We retrospectively studied pubic bones from males ($n = 88$) and females ($n = 113$) over 40 years of age undergoing clinical multi-slice computed tomography (MSCT) in a French hospital between November 2017 and April 2018. The results revealed a significant negative correlation between BMD and age for males ($R = -0.62$) and females ($R = -0.55$). The intra- and inter-observer reliabilities of the phase allocation were moderate for males (kappa values at 0.72 and 0.65) and strong for females (kappa values at 0.93 and 0.86). Moreover, a significant difference in BMD between stages 6-1 and 6-2 for males was observed. We hypothesize that BMD might help improve the reliability of the SB system for older individuals. In addition to the pubic bone, numerous other anatomical regions such as the area of Ward could represent interesting areas of study in order to relate bone density to age.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In forensic anthropology, the estimation of age at death is mainly required to establish a biological profile and facilitate individual identification [1–3]. The pubic symphysis represents one of the most studied skeletal structures due to its late maturation [4]. In this respect, the Suey-Brooks (SB) system is one of the most commonly used and tested methods of assessment based on the morphological characteristics of the pubic symphysis [5–7].

However, the SB method has certain drawbacks, including frequently inaccurate estimation for individuals over 40 years old [8–11].

Bony structures are constantly remodeling. This is mainly seen as a reduction in bone mass and density with increasing age, in addition to other hormonal, genetic and biomechanical factors [12–14]. Bone mineral density (BMD) loss due to aging seems to be linear in males, and can be acute in females during the perimenopause period, potentially involving osteoporosis [15–17]. Thus, BMD may constitute an objective, continuous and repeatable parameter that can yield a more accurate estimate of age than the usual morphological techniques, especially for those over 40 years old [18].

Moreover, the reduction in BMD (as measured through bone densitometry) with age may partially embody the pubic bone morphological criteria usually described on dry bones (mass loss and porosity) and represents a relevant biological indicator for age-at-death estimation [17]. Therefore, this approach may improve the SB method via the use of computed tomography (CT), especially in advanced phases (4–6), in which bone degeneration

* Corresponding author at: UNAM, Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire, 4 Rue Larrey, 49933 Angers Cedex 9, France.
E-mail address: olivier.dubourg@chu-angers.fr (O. Dubourg).

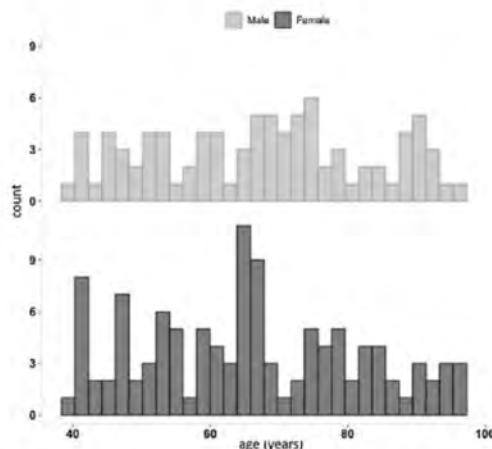


Fig. 1. Histogram showing the distribution by age of the study sample.

occurs in particular. Some previous studies have already demonstrated the contribution of CT in evaluating trabecular bone changes [18–25]. Indeed, in addition to preserving the integrity of the material, it facilitates computer measurements of the bone density and thus greater precision in age estimation [4,26].

The aim of this work was to test the evolution of pubic bone mineral density (BMD) according to age, especially for individuals over 40 years old.

2. Materials

2.1. Sample

We undertook a retrospective study of pubic bones from male and female adults over 40 years of age undergoing clinical multi-slice computed tomography (MSCT) in a hospital in Toulouse, France, between November 2017 and April 2018. The MSCT were mainly requested in the clinical context of general condition alteration or suspicion of abdominal diseases. Patients with a known history of bone disease or pelvic trauma, as well as patients with materials causing artifacts such as hip replacements, were excluded. A total of 88 males (mean age 67.4 years; median age 68 years; minimum age 40 years; maximum age 97 years; SD 15.5) and 113 females (mean age 65.78 years; median age 65 years; minimum age 40 years; maximum age 97 years; SD 15.6) were recorded (Fig. 1).

According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when these examinations have been conducted for clinical purposes and when they have been recorded anonymously (Article 40-1, Law 94-548 of 1st July 1994).

2.2. MSCT

MSCT images were obtained through a Picture Archiving and Communication System (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by the hospital. Examinations were performed on an Optima 64-detector row CT scanner (General Electric Medical Systems). The image matrix was 512 × 512 pixels. A soft tissue filter was used and axial reconstructions were performed every 1.25 mm with a 1.25 mm slice thickness.

Since the CT acquisition parameters were not the same in every case, a phantom, as an imaging standard, was used to calibrate and normalize bone density values with every patient. The software used for the phantom was QCT PRO™ (Bone Mineral Densitometry Software CT Calibration Phantom, Mindways Software, Austin, TX, USA).

Scans were saved as digital imaging and communications in medicine (DICOM) files.

3. Methods

3.1. Measures of density and data recovery

Images were analyzed and measurements were taken using Osirix software (Osirix MD 10.0, <https://www.osirix-viewer.com>). The average density values were in Hounsfield Units (HU).

A measure corresponding to a 1.6 cm² circle was performed on each of the five rods of the phantom, from the least radio-opaque (the highest HU value) to the most radiopaque (the lowest HU value). These regions of interest (ROIs) were named "ROI1", "ROI2", "ROI3", "ROI4" and "ROI5". The bone mineral densities of the various rods of the phantom were known and permitted for conducting the calibration (Fig. 2A).

The pubis bone measurements were performed on an axial plane on the left and right pubis. The ROIs were named RMR and LMR (respectively for right medium region and left medium region) and were placed on the slice that depicted the largest section of the pubic auricular surface. The ROIs were placed in the center of the cancellous bone, without reaching the cortical bone (Fig. 2B).

The calibration of measurements was performed according to the phantom values for transforming the HU into a density value (mg/cm³ aqueous equivalent of K₂HPO₄¹) [27]. The scale of values is a linear relationship of the density of a voxel to the radio-density of water:

$$HU = 1000 \times \frac{\mu_x - \mu_{water}}{\mu_{water}}$$

¹ This method defines a stable bone equivalent material used as a bone reference standard to calibrate all scanning systems.

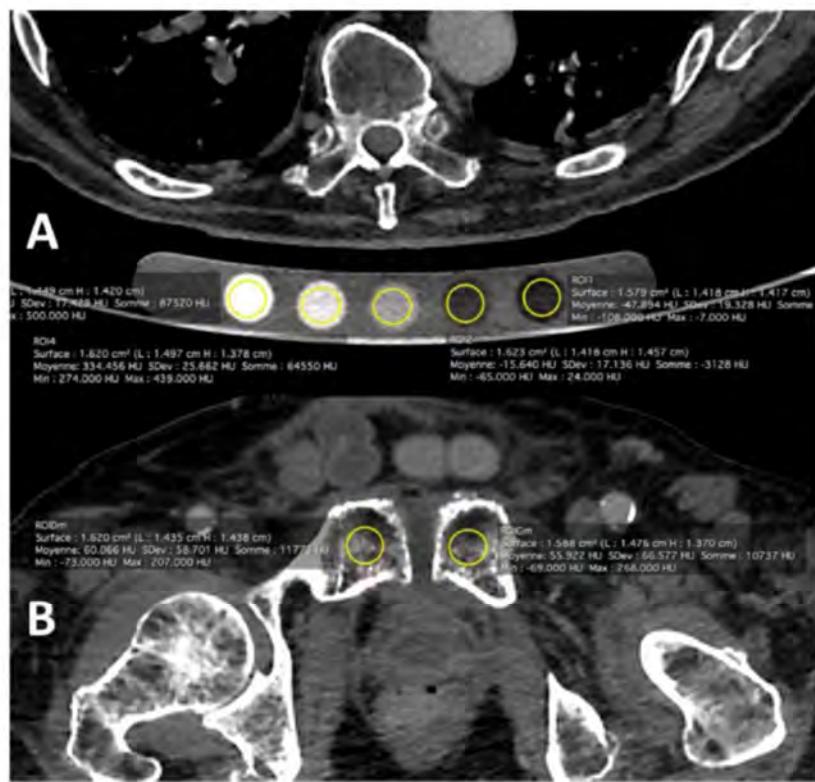


Fig. 2. Positioning of ROIs on the rods of the phantom (A) and on right and left pubis (B).

here μ_x is the average absorption coefficient of a voxel and μ_{water} the absorption coefficient of water.

3.2. Morphological 3D analysis and phase allocation

The right pubis was chosen arbitrarily. Reconstruction of the surface was performed using the *Isosurface* function of Amira[®] software (Amira 5.4.2, Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA, USA). The right pubis was isolated and edited with the Extract Surface and Surface Editor functions. A phase was allocated to each pubis using morphological criteria and the Suchey-Brooks system [5]. Within each of the 6 usual phases, the early pattern (-1) and the advanced pattern (-2) were separated [5]. Phase allocation was consensually performed by two experienced observers. All images were analyzed without knowledge of the age of the subject and in an arbitrary order. Observers could rotate the bone in three dimensions.

3.3. Statistical analysis

All statistical analyses and the graphical representations were conducted with R 3.0.2 software (R Development Core Team, <http://www.R-project.org>).

For the measures of the density, intra- and inter-observer variability were tested using the intraclass correlation coefficient (ICC) on the density values (mg/cm^3) of 25 patients for both sexes. The patients were chosen randomly and the measures were performed on the right and left pubic bones. The density of the rods of the phantom was not measured a second time and the calculation was made from the first determination.

In order to examine the effects of intra-observer reliability of the phase allocation, an observer carried out an observation of 25 randomized specimens of each sex from the sample and a second observation one month after the first. To assess inter-observer reliability, the second observer carried out an observation of the same 25 specimens. In each case, squared Cohen's Kappa coefficients were calculated. The correlation between bone density and age was tested. Finally, a mean value of bone density (mBD) was calculated for each individual and Pearson's correlation was undertaken between the age and mBD for each sex.

The correlation between bone density and phases of Suchey-Brooks was also tested. We carried out basic descriptive statistics for each phase and sex (ANOVA) and for consecutive stages (Tukey's test). Spearman's correlation was used between the Suchey-Brooks stages and the mBD. The authors underline that the stages 4-1 and 4-2 were fused for each sex on account of the small number of individuals.

4. Results

4.1. Intra- and inter-observer variability of the bone density measurements

The intra- and inter-observer variabilities of the bone density measurements were excellent with ICC values of 0.97 and 0.92 ($p < 0.0001$) for males and 0.99 and 0.96 ($p < 0.0001$) for females, respectively.

4.2. Intra- and inter-observer variability of the phase allocation

The intra- and inter-observer reliabilities were moderate for male individuals and strong for female individuals. The kappa values were 0.72 ($p < 0.001$) and 0.65 ($p < 0.001$) for males and 0.93 ($p < 0.001$) and 0.86 ($p < 0.001$) for females, respectively. Errors mainly consisted of overestimation or underestimation of adjacent patterns 4-2/5-1, 5-1/5-2 and 5-2/6-1.

4.3. Statistics about the left and right pubis bone density

The normality of the left and right pubis BMD values was confirmed by the Shapiro test. A t-test was performed to confirm no difference between the left and right sides ($t = -0.29$ and $p = 0.76$ for males and $t = -0.78$ and $p = 0.43$ for females).

4.4. Pearson's correlation between bone density and age

The results revealed a significant negative correlation between the mBD and age for male (correlation coefficient (R) = -0.62 ; coefficient of determination (R^2) = 0.38 ; and $p < 0.0001$) and female individuals (correlation coefficient (R) = -0.55 ; coefficient of determination (R^2) = 0.30 ; and $p < 0.0001$). The regression lines, confidence and prediction intervals are presented in Fig. 3.

4.5. Descriptive statistics and Spearman correlation between bone density and Suchey-Brooks phases

An ANOVA was performed to reveal a significant difference between the mBD for each phase and sex ($p < 0.0001$ for male and $p = 0.0004$ for female individuals) (Table 1). More specifically, there was a significant difference between the consecutive stages 6-1 and 6-2 for male individuals revealed by a Tukey's test ($p = 0.002$) (Table 1), as shown in Fig. 4.

The results showed a significant moderately negative correlation between the mBD and Suchey-Brooks phases for male (Spearman rho = -0.48 ; $p < 0.0001$) and female individuals (Spearman rho = -0.33 ; $p = 0.0003$).

5. Discussion

Although it is clear that bone density decreases with age, relatively few studies have sought to link these density changes to

age estimation [16,17,22,25,28]. Thanks to an original methodological approach consisting of transforming raw scannographical measurements (HU) into density values, our study reported a correlation coefficient value between bone density and age at -0.62 for male and -0.55 for female individuals. Cunha et al. set the minimal correlation for a valid age indicator at 0.9 [24]. However, the highest correlation with an age estimation method found in the literature is -0.76 for BMD in the area of Ward in the proximal extremity of the femur [17].

Our results generally correspond with the values in the literature. Lopez-Alcaraz et al. reported a correlation between the bone density of the pubis bone and the chronological age at -0.6 for males [25]. In spite of this significant correlation, bone density is rarely used for age estimation in post-mortem cases [26]. Indeed, we can hypothesize that bone density changes are different between cadavers and living individuals, and may also differ according to the post-mortem interval. Regarding living individuals, bone density changes are well described with a BMD loss due to aging and depending on the gender; while in cadavers the changes may refer to the state of decomposition of the body and taphonomic alterations. Moreover, in post-mortem situations CT images can include some artifacts and may prove more difficult to use [22]. For this reason, our preliminary study is based on clinical CT analysis.

We reported a more significant correlation between bone density and age for males (-0.62) than for females (-0.55). This differentiation may originate in numerous morphological changes occurring in females (such as hormonal factors, osteoporosis or hormone replacement treatment) and eventually even former factors such as obstetrical traumas.

Moreover, Lopez-Alcaraz et al. reported a significant correlation (0.73 for males and 0.85 for females) with biological age resulting from bone density and chronological age [25].

As noted by Todd [6] through radiographs of the pubis, there is a major open mesh of trabeculae with age. These trabeculae appear thicker, less numerous and increasingly oriented medio-laterally [18]. Many radiographic techniques have been developed for age estimation based on the evaluation of trabecular architecture in the femur, humerus, clavicle and pubis [29–33]. These works are based on different stages and study some qualitative factors such as the main tension lines in the diaphysis and epiphysis, the area of the medullar cavity and the porosity of the external surface bone. More recently, Wade et al. and Villa et al. tested a number of

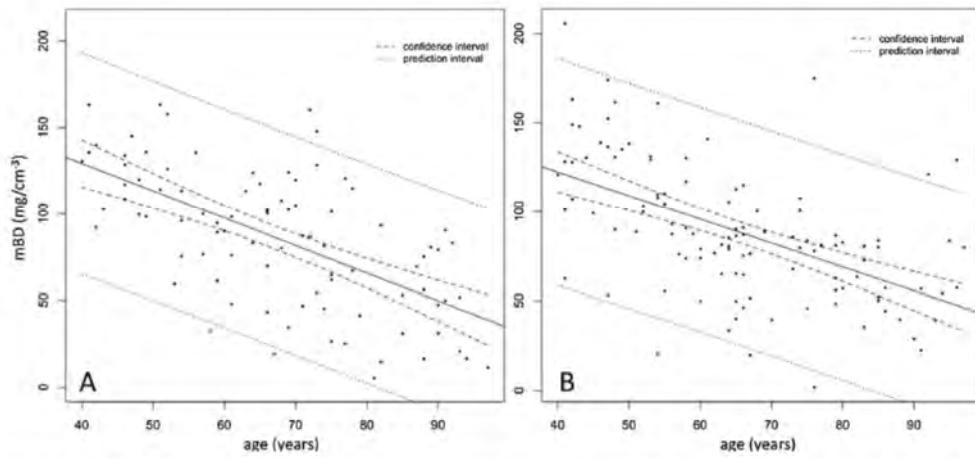


Fig. 3. Scatter plot of the mean bone density (mBD) (mg/cm^3) aqueous equivalent of K_2HPO_4) vs. age in male (A) and female individuals (B).

Table 1
Descriptive statistics.

Male individuals					Female individuals			
Phase	n =	mBD (sd)	Tukey's range	ANOVA(p-value)	n =	mBD (sd)	Tukey's range test (p-value)	ANOVA(p-value)
test (p-value)								
4	11	118.6 (22.3)	0.59		20	107.9 (49.5)	0.36	
5-1	23	100.6 (30.5)			47	90.8 (31.9)		
5-2	25	78 (38.1)	0.15	F=9.69	14	97.4 (26.2)	0.97	F=5.56
6-1	18	86.3 (40.5)	0.93	<0.0001	15	77.3 (37.6)	0.54	0.0004
6-2	11	37.5 (24.7)	0.002		17	57.3 (25.5)	0.49	

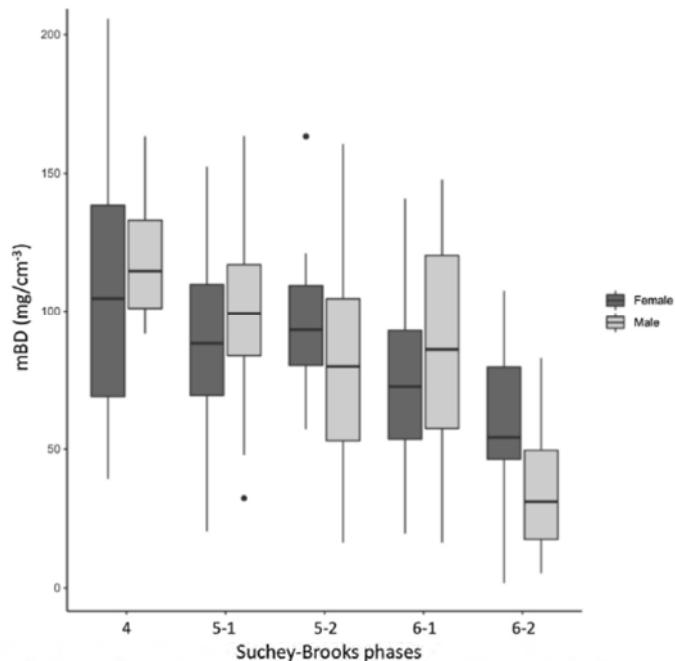


Fig. 4. Boxplot of the mean bone density (mBD) (mg/cm^3 aqueous equivalent of K_2HPO_4) vs. Suchey-Brooks phases in male and female individuals.

morphological parameters and examined correlations between age-at-death and changes in the trabecular structure of the pubis [18,22] and the auricular surface [22].

There are many interesting reasons why bone density could be used for age estimation. First, it is an easily accessible measure with CT, which does not require the generation of complex 3D reconstructions. Incidentally, in the manner of our results, the inter-observer variability of the bone density measurements seems to be far superior to phase allocation variability. This is remarkable given that the estimation of older individuals (especially those over 40 years old) is frequently inaccurate via methods based on morphological features [8–11,20,34–37]. Second, using a continuous parameter such as bone density appears more appropriate for age estimation than discrete analysis by phases [2,3,18,38,39]. Incidentally, the SB system is based on morphological non-continuous changes (lipping, ridging, depression, and erosion) that can be difficult to differentiate, which might decrease reproducibility [2,3,18,38,39].

As regards to our results concerning the variability of the phase allocation, the intra- and inter-observer reliabilities were strong for females and moderate for males. In the SB system, the changes are divided into six phases for males and females, each with an age

range, mean and an early and late stage – not considered for age estimation in the method [5,7]. Some previous studies have highlighted how most estimation errors occur for the advanced stages (4, 5 and 6), whereas reproducibility seems to be considerable in the initial stages (1, 2 and 3) [19,34–37].

In addition, we highlighted a specific difference in bone density between stages 6-1 and 6-2 for males in the SB system. Thus, bone density may facilitate differentiation between early and late stages. As Berg has argued [40], a stage 7 could be proposed in order to improve the reliability of the SB system for the oldest individuals. However, the particular characteristics of this stage, including mass and porosity, fit for dry bone. Bone density may enable the transposition of these criteria by alluding a "tomodensitometric" stage 7 [40] and sharpening phase allocation in the SB system.

This preliminary study presents some limitations, namely an exhaustive approach that necessitates consideration of factors such as ancestry, health and physical activity. Moreover, it may be interesting to conduct a study comparing ante-mortem and post-mortem changes, and to distinguish between fresh cadavers and putrefied corpses. Indeed, the state of decomposition of the body appears to constitute a major issue for consideration when interpreting bone density values in a post-mortem CT. According

to the forensic literature, the presence of gas of putrefaction is likely to modify the structure of the trabecular bone by creating gas bubbles on the bones [41]. As our sample regards, individuals underwent a scan in the clinical context of general condition alteration or suspicion of abdominal diseases, which was a selection bias. Yet they were not necessarily affected by a chronic disease or any organic pathology. Thus this population was quite naturally diversified and may in that sense be representative of the general population.

The strength of this study is to point out an original approach consisting of transforming raw scannographical measurements (HU) into density values using a phantom to calibrate and normalize bone density values. Bone density could constitute a useful quantitative parameter for age estimation because it presents the advantages of being reproducible and continuous [2,3,18,38,39]. Furthermore, it could represent the “numerical equivalent” of dry bone features such as mass or porosity [40].

Finally, the authors suggest that this preliminary study should be extended to a wider population. In addition to the pubic bone, the area of Ward in the proximal extremity of the femur has already been studied and (in spite of a lack of accuracy) seems to represent a very interesting anatomical region for linking bone density with age. On the one hand, this is a region that supports a greater body weight load and is subject to more bone remodelling changes. On the other hand, this is directly related to sex, since men are usually stronger than women. Body weight is an important determinant of bone mass and greater body weight is associated with greater skeletal mass and therefore with lower bone loss [16,28].

Conflict of interest

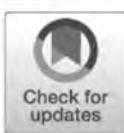
The authors declare that they have no conflicts of interest.

CRediT authorship contribution statement

Olivier Dubour: Conceptualization, Writing - original draft, Formal analysis, Investigation. **Marie Faruch-Bilfeld:** Resources, Software. **Norbert Telmon:** Supervision, Validation, Project administration. **Estelle Maupoint:** Resources, Software. **Pauline Saint-Martin:** Methodology, Investigation, Validation, Writing - review & editing. **Frédéric Savall:** Methodology, Conceptualization, Validation, Formal analysis, Writing - review & editing.

References

- [1] E. Cunha, E. Baccino, L. Martrille, et al., The problem of aging human remains and living individuals: a review, *Forensic Sci. Int.* 193 (2009) 1–13.
- [2] L. Fanton, M.P. Gustin, U. Paultre, et al., Critical study of observation of the sternal end of the right 4th rib, *J. Forensic Sci.* 55 (2010) 467–472.
- [3] L.W. Konigsberg, N.P. Hermann, D.J. Wescott, et al., Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 541–557.
- [4] F. Savall, C. Rérolle, F. Hérin, et al., Reliability of the Suchey-Brooks method for a French contemporary population, *Forensic Sci. Int.* 266 (2016) 586.
- [5] S. Brooks, J.M. Suchey, Skeletal age determination based on the os pubis: a comparison of the Acsadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods, *Hum. Evol.* 5 (1990) 227–238.
- [6] T.W. Todd, Age changes in the pubic bones, I: the white male pubis, *Am. J. Phys. Anthropol.* 3 (1920) 285–334.
- [7] T.W. McKern, T.D. Stewart, Skeletal Age Changes in Young American Males, Quartermaster Research and Development Command Technical Report Natick MA, (1957).
- [8] R.D. Hoppa, Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis, *Am. J. Phys. Anthropol.* 111 (2000) 185–191.
- [9] A. Schmitt, Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample, *Int. J. Osteoarchaeol.* 14 (2007) 1–6.
- [10] E. Baccino, J.C. Tavernier, H. Lamendin, et al., Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes, *Journal de Médecine Légale et Droit Médical* 34 (1991) 27–33.
- [11] C.O. Lovejoy, R.S. Meindl, R.G. Tague, et al., The senescent biology of the hominoid pelvis, *J. Anthropol. Sci.* 73 (1995) 31–49.
- [12] P. Virtama, T. Helela, Radiographic measurements of cortical bone: variations in a normal population between 1 and 90 years of age, *Acta radiol.* 293 (1969) 268.
- [13] J. Dequeker, K. Gautama, Y.S. Roh, Femoral trabecular patterns in asymptomatic spinal osteoporosis and femoral neck fracture, *Clin. Radiol.* 25 (1974) 243–246.
- [14] S. Mays, The effects of factors other than age upon skeletal age indicators in the adult, *Ann. Hum. Biol.* 42 (2015) 332–341.
- [15] M. Nogueira, R. Lucas, I. Ramos, et al., Curvas osteodensitométricas numa população de mulheres, *Acta Reumatol. Port.* 36 (2011) 126–136.
- [16] F. Curate, A. Albuquerque, E. Cunha, et al., Age at death estimation using bone densitometry: testing the Fernandez Castillo and Lopez Ruiz method in two documented skeletal samples from Portugal, *Forensic Sci. Int.* 3 (2013) 296.
- [17] D. Navega, J.O. Coelho, E. Cunha, et al., DXAGE: a new method for age at death estimation based on femoral bone mineral density and artificial neural networks, *J. Forensic Sci.* 63 (2018) 2.
- [18] A. Wade, A. Nelson, G. Garvin, et al., Preliminary radiological assessment of age-related change in the trabecular structure of the human os pubis, *J. Forensic Sci.* 56 (2011) 312–319.
- [19] C. Villa, J. Buckberry, C. Cattaneo, et al., Technical note: reliability of Suchey-Brooks and Buckberry-Chamberlain methods on 3D visualizations from CT and laser scans: age estimation methods and 3D visualizations, *Am. J. Phys. Anthropol.* 151 (2013) 158–163.
- [20] C. Villa, J. Buckberry, C. Cattaneo, et al., Quantitative analysis of the morphological changes of the pubic symphyseal face and the auricular surface and implications for age at death estimation, *J. Forensic Sci.* 60 (2015) 556–565.
- [21] F. Dedouit, F. Savall, F.Z. Mokrane, et al., Virtual anthropology and forensic identification using multidetector CT, *Br. J. Radiol.* 87 (2014) 20130468.
- [22] C. Villa, M.N. Hansen, J. Buckberry, et al., Forensic age estimation based on the trabecular bone changes on the pelvic bone using post-mortem CT, *Forensic Sci. Int.* 233 (2013) 393–402.
- [23] C. Villa, J. Buckberry, N. Lynnerup, Evaluating osteological ageing from digital data, *J. Anat.* (2016) doi:<http://dx.doi.org/10.1111/joa.12544>.
- [24] E. Cunha, Paléodémographie, in: C. Susanne, E. Rebato, B. Chiarelli (Eds.), *Anthropologie Biologique: évolution Et Biologie Humaine*, De Boeck Université, 2003, pp. 768 ISBN: 2-8041-3967-0.
- [25] M. Lopez-Alcaraz, P.M. Garamendi Gonzalez, I.A. Aguilera, et al., Image analysis of pubic bone for age determination in a computed tomography sample, *Int. J. Legal Med.* 129 (2015) 335–346.
- [26] F. Savall, F. Hérin, P.A. Peyron, et al., Age estimation at death using pubic bone of a virtual reference sample, *Int. J. Legal Med.* (2018) 609–615.
- [27] M.R. Witt, J.R. Cameron, An Improved Bone Standard Containing Dipotassium Hydrogen Phosphate Solution for the Intercomparison of Different Bone Scanning Systems, US Atomic Energy Commission, Washington, DC, 1970.
- [28] R.F. Castillo, C. Ruiz Mdel, Assessment of age and sex by means of DXA bone densitometry: application in forensic anthropology, *Forensic Sci. Int.* 209 (2011) 53–58.
- [29] R. Macchiarelli, L. Bonioli, Linear densitometry and digital image processing of proximal femur radiographs: implications for archaeological and forensic anthropology, *Am. J. Phys. Anthropol.* 93 (1994) 109–122.
- [30] J. Szilvassy, H. Kritscher, Estimation of chronological age in man based on the spongy structure of long bones, *Anthropol. Anz.* 48 (1990) 289–298.
- [31] R. Walker, C.O. Lovejoy, Radiographic changes in the clavicle and proximal femur and their use in the determination of skeletal age at death, *Am. J. Phys. Anthropol.* 68 (1985) 67–78.
- [32] D. Schranz, Age determination from the internal structure of the humerus, *Am. J. Phys. Anthropol.* 17 (1970) 263–270.
- [33] G. Acsadi, J. Nemeskeri, *History of Human Life Span and Mortality*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- [34] N. Telmon, A. Gaston, P. Chemla, et al., Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis, *J. Forensic Sci.* 50 (2005) 507–512.
- [35] N. Lottering, D.M. MacGregor, M. Meredith, et al., Evaluation of the Suchey-Brooks method of age estimation in an Australian subpopulation using computed tomography of the pubic symphyseal surface, *Am. J. Phys. Anthropol.* 150 (2013) 386–399.
- [36] J.M. Fleischman, A comparative assessment of the Chen et al. and Suchey-Brooks pubic aging methods on a North American sample, *J. Forensic Sci.* 58 (2013) 311–323.
- [37] M. San Millan, C. Rissech, D. Turbon, A test of Suchey-Brooks (pubic symphysis) and Buckberry-Chamberlain (auricular surface) methods on an identified Spanish sample: paleodemographic implications, *J. Archaeol. Sci.* 40 (2013) 1743–1751.
- [38] C. Rougé-Maillart, B. Vieille, N. Jousset, et al., Development of a method to estimate skeletal age at death in adults using the acetabulum and the auricular surface on a Portuguese population, *Forensic Sci. Int.* 188 (2009) 91–95.
- [39] E. Baccino, D.H. Ubelaker, L.A. Hayek, et al., Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains, *J. Forensic Sci.* 44 (1999) 931–936.
- [40] G.E. Berg, Pubic bone age estimation in adult women, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 569–577.
- [41] C. Egger, P. Vaucher, F. Doenz, et al., Development and validation of a postmortem radiological alteration index: the RA-Index, *Int. J. Legal Med.* 126 (2012) 559–566.



Technical note: age estimation by using pubic bone densitometry according to a twofold mode of CT measurement

Olivier Dubourg^{1,2} · Marie Faruch-Bilfeld^{1,3} · Norbert Telmon^{1,4} · Frédéric Savall^{1,4} · Pauline Saint-Martin^{1,5}

Received: 19 March 2020 / Accepted: 15 June 2020
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract

In forensic anthropology, age estimation is a major element in the determination of a biological profile and the identification of individuals. Thus, many anatomical structures have been studied, such as the pubic symphysis, which is a source of major interest due to its late maturation. One of the most well-known methods of assessment is the Suchey-Brooks (SB) system based on the morphological characteristics of the pubic symphysis. The aim of this study was to propose linear regression formulae in order to deduce chronological age from bone density, using both Hounsfield unit (HU), and mean bone density (mBD) values of the pubic symphysis. Moreover, we intended to test the reliability and then to explore the feasibility of using HU instead of mBD values for age estimation. We built retrospectively a reference sample of 400 pubic symphyses using computed tomography at a French hospital and a test sample of 120 pubic symphyses. Equations were created to establish linear regression models for age estimation. Inaccuracy and bias were calculated for individuals aged more or less than 40 years. We highlighted homogeneous mean absolute errors for both HU and mBD values, most of them being less than 10 years. Moreover, we reported a moderate overestimation for younger individuals and a very small underestimation for older individuals. This study proposes a correlation between the bone density and age of individuals with a valuable level of reliability. Finally, HU measurements seem to be suitable for linking bone density with the age of individuals in forensic practice.

Keywords Forensic anthropology · Age estimation · Mean bone density · Hounsfield unit · Pubic bone · Computed tomography

Introduction

In forensic anthropology, establishing an age at death is a major element for the determination of a biological profile

✉ Olivier Dubourg
olivierdub@hotmail.fr

¹ Laboratoire d'Anthropologie Moléculaire et d'Imagerie de Synthèse, Université Toulouse III, AMIS FRE 2960 CNRS, 37 allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France

² UNAM, Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire, 4 rue Larrey, 49933 Angers Cedex 9, France

³ Institut de l'appareil locomoteur, Centre Hospitalier Universitaire de Toulouse, Purpan, Bâtiment Pierre Paul Riquet, place du Dr Baylac, TSA, 40031, 31059 Toulouse Cedex 9, France

⁴ Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire, Rangueil, 1 avenue du Professeur Jean Poulhès, 31059 Toulouse Cedex 9, France

⁵ Institut Médico-Légal, Centre Hospitalier Régional Universitaire, 37044 Tours Cedex 9, France

and the identification of individuals [1–4]. In this respect, many anatomical structures have been studied, such as the pubic symphysis, which is a source of major interest due to its late maturation [5]. One of the most commonly used and tested methods of assessment is the Suchey-Brooks (SB) system based on the morphological characteristics of the pubic symphysis [6–8]. This method entails some drawbacks, such as a lack of precision, especially for older individuals [9–12]. Besides, bone density represents a relevant biological indicator for age estimation [13] and seems to highlight an interesting correlation with age of individuals [14–16]. By protecting the integrity of the material, the contribution of computed tomography (CT) in measuring this continuous parameter appears significant [13, 17, 18] and could enable a higher precision in age estimation [5, 16].

CT is particularly used in radiological practice for measuring bone density. In this respect, mean bone density (mBD) seems to be the reference value [19, 20], even though Hounsfield units (HU) values are increasingly the target of many specialized studies [21, 22].

The aim of this study was to propose linear regression formulae from a reference sample in order to deduce chronological age from bone density, using both HU and mBD values, at the pubic symphysis. Moreover, we intended to test the reliability of the models by calculating the accuracy and precision from a test sample and then to explore the interest of using HU instead of mBD values for age estimation.

Materials

Reference sample

We undertook a retrospective study of pubic bones from male and female adults undergoing clinical multi-slice computed tomography (MSCT) in a hospital in Toulouse, France, between 2015 and 2017. The MSCTs were mainly requested in the clinical context of general condition alteration or suspicion of abdominal disease. Patients with a known history of bone disease or pelvic trauma, as well as those with materials causing artifacts, such as hip replacements, were excluded. A total of 200 males (mean age 58.5 years; median age 60 years; minimum age 17 years; maximum age 94 years; SD 17.1) and 200 females (mean age 62.3 years; median age 65 years; minimum age 15 years; maximum age 99 years; SD 19.2) were included (Fig. 1).

Test sample

The test sample was built retrospectively and randomly by including male and female adults undergoing clinical MSCT in a hospital in Toulouse, France, in 2018. A total of 60 males (mean age 62.4 years; median age 61 years; minimum age 21 years; maximum age 97 years) and 60 females (mean age 51.6 years; median age 52.5 years; minimum age 20 years; maximum age 94 years) were recorded.

According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when those examinations have been conducted for clinical purposes and have been recorded anonymously (Article 40-1, Law 94-548 of 1st July 1994).

MSCT

Examinations were performed using an Optima 64-detector row CT scanner (General Electric Medical Systems). A Picture Archiving and Communication System (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by the hospital enabled us to acquire MSCT images. The image matrix was 512×512 pixels and a soft-tissue filter was used. Axial reconstructions were performed every 1.25 mm with a slice thickness of 1.25 mm.

Owing to the differences in CT acquisition settings for every case, a phantom was used as an imaging standard to

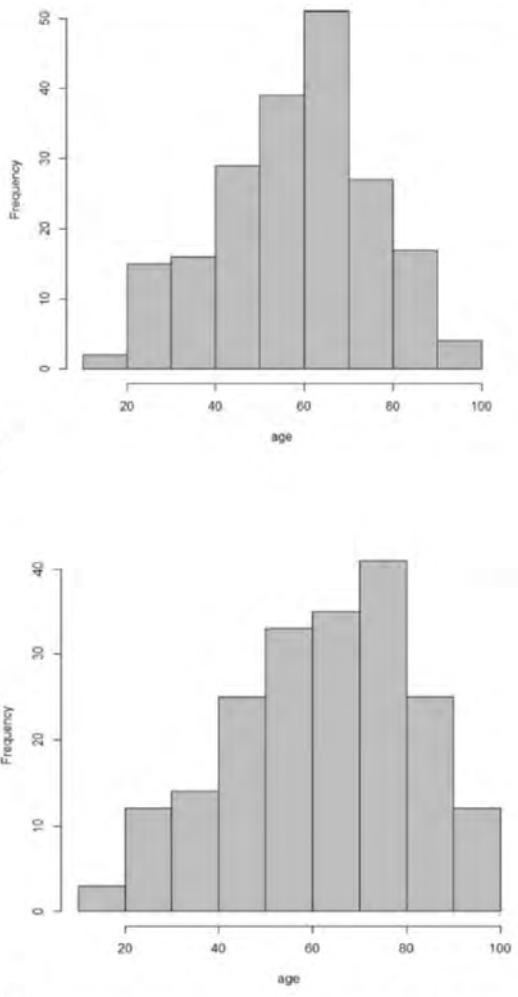


Fig. 1 Histograms showing the distribution by age of the reference sample (A male, B female)

calibrate and normalize bone density values with every patient. The software used for the phantom was QCT PRO™ (Bone Mineral Densitometry Software CT Calibration Phantom, Mindways Software, Austin, TX, USA).

Scans were saved as digital imaging and communications in medicine (DICOM) files.

Methods

Measures of density and data recovery

Images were analyzed, and measurements were taken using OsiriX software (OsiriX MD 10.0, <https://www.osirix-viewer.com>). The raw density values were in HU. Using the

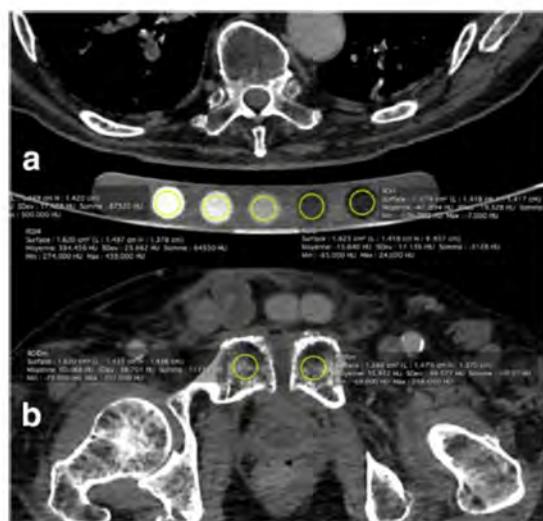


Fig. 2 Positioning of ROIs on the rods of the phantom (A) and on right and left pubis (B)

methodology of the preliminary study [14], a measurement corresponding to a 1.6-cm² circle was performed on each of the five rods of the phantom, from the least radio-opaque (the highest HU value) to the most radio-opaque (the lowest HU value). These regions of interest (ROIs) were named "ROI1," "ROI2," "ROI3," "ROI4," and "ROI5." The bone densities of the various rods of the phantom were known and permitted the calibration (Fig. 2a).

The pubis pubic bone measurements were made on an axial plane on the left and right pubis. The ROIs were named RMR and LMR (respectively for right medium region and left medium region) and were placed on the slice that depicted the largest section of the pubic auricular surface. The ROIs were placed in the center of the cancellous bone, without reaching the cortical bone (Fig. 2b).

The calibration of measurements was performed according to the phantom values for transforming the HU into mBD (mg/cm³ aqueous equivalent of K₂HPO₄) [23].

Thus, this process enabled the use of two types of measurement for the purpose of meeting the initial aims: on the one hand, a phantomless value before calibration (HU value), and on the other hand, a phantom-based value after calibration (mBD value).

Statistical analysis

All statistical analyses and graphical representations were conducted with R 3.0.2 software (R Development Core Team, <http://www.R-project.org>).

¹ This method defines a stable bone equivalent material used as a bone reference standard to calibrate all scanning systems.

For the measurements of the density, intra- and inter-observer variabilities were tested using the intraclass correlation coefficient (ICC) on the density values (mg/cm³) of 25 patients of each sex. The patients were chosen randomly, and the measurements were performed on the right and left pubic bones.

Pearson's correlations were undertaken between bone density in HU and mBD values and age for each sex. Linear regression equations were run for males and females.

The reliability of the reference sample was tested by the calculation of inaccuracy and bias, both before and after calibration. Mean errors between the calculated and real ages were determined for individuals aged more or less than 40 years old, according to the type of measurement (HU or mBD values). Inaccuracy was calculated as: $\sum|\text{estimated age} - \text{real age}|/n$, showing the average magnitude of the absolute error. Bias was calculated as: $\sum(\text{estimated age} - \text{real age})/n$, expressing the tendency for either over- or underestimation of age.

Results

Intra- and inter-observer variability of the bone density measurements

The intra- and inter-observer variabilities of the bone density measurements were excellent, with ICC values of 0.96 and 0.86 ($p < 0.0001$) for males and 0.99 and 0.95 ($p < 0.0001$) for females, respectively.

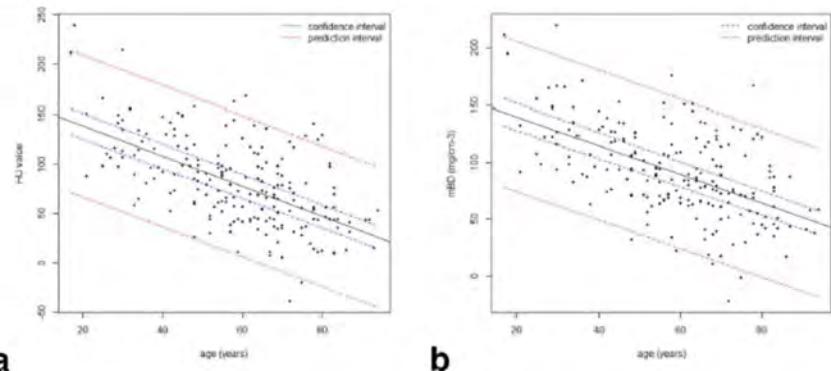
Statistics of the left and right pubis bone density

The normality of the left and right pubis mBD values was confirmed by the Shapiro test. A *t* test was performed to confirm no difference between the left and right sides ($t = 0.1$ and $p = 0.91$ for males and $t = 0.3$ and $p = 0.75$ for females).

Pearson's correlation between bone density and age

The results revealed a significant negative correlation between mBD and age for male (correlation coefficient (R) = -0.54 ; coefficient of determination (R^2) = 0.3 ; and $p < 2.2 \times 10^{-16}$) and female individuals ($R = -0.61$, $R^2 = 0.37$, and $p < 2.2 \times 10^{-16}$). These results were similar to the correlation between the HU value and age for male ($R = -0.59$, $R^2 = 0.35$, and $p < 2.2 \times 10^{-16}$) and female individuals ($R = -0.69$, $R^2 = 0.48$, and $p < 2.2 \times 10^{-16}$). The regression lines, confidence, and prediction intervals are presented in Figs. 3 (for males) and 4 (for females).

Fig. 3 Scatter plot of the HU value (A) and mean bone density (mBD; mg/cm³ aqueous equivalent of K₂HPO₄; B) vs. age in males



Regression equations

Tables 1 (for males) and 2 (for females) present the linear regression equations, including the correlation coefficient (*R*), the coefficient of determination (*R*²), and the standard error of the estimate (SEE), according to the method of bone density measurement (before calibration: HU value; after calibration: mBD value).

Reliability of the reference sample

Table 3 (for males) and Table 4 (for females) show the inaccuracy and bias for individuals aged more or less than 40 years old according to the method of bone density measurement. Inaccuracy was slightly higher for males aged over 40 years than for males aged 40 years or less, regardless of the calibration or not. For females, inaccuracy was roughly the same in all groups. Generally, bias was very low.

precision, a few studies have tended to use bone mineral density for age estimation [13, 15, 17, 18, 24, 25]. Our study reported a correlation coefficient value between bone density and age of -0.54 for males and -0.61 for females, similar to the correlation between the HU value and age, and substantially the same as in the preliminary study (-0.55 for females and -0.62 for males) [14]. These results are in accordance with the values in the literature, namely, those reported by Lopez-Alcaraz et al. [15]. More broadly, the best correlation found in the literature is -0.76 and regards the area of Ward in the proximal extremity of the femur [13]. Moreover, in light of our results, the intra- and inter-observer variabilities were excellent and reinforce the observation that bone mineral density is a reliable criterion for age estimation.

In addition to showing a significant correlation with age, bone density has the advantage of being easy to measure by CT and to constitute a continuous parameter. The latter seems to run counter to the morphological bony criteria used in the SB system, which are likely to show reproducibility [2, 4, 26–28]. Moreover, we may consider it more interesting to use a quantitative criterion such as bone density in order to develop linear regression models for age estimation.

The methodological originality of our study can be found in the use of phantoms to calibrate and transform raw

Discussion

While methods in forensic anthropology are inevitably subject to further evolution due to the search for reliability and

Fig. 4 Scatter plot of the HU value (C) and mean bone density (mBD; mg/cm³ aqueous equivalent of K₂HPO₄; D) vs. age in females

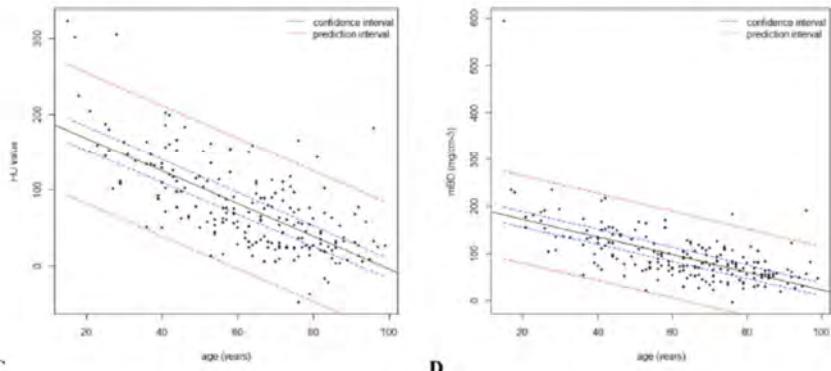


Table 1 Regression equations for males

	R	R ²	Regression equation	SEE
Before calibration	-0.59	0.35	HU = -1.51 (age) + 168.67	8.97
After calibration	-0.54	0.3	mBD = -1.26 (age) + 165.28	8.24

scannographical measurements (HU) into density values. Thus, this approach enables the creation of a general and uniform standard for all measurements, whatever the CT acquisition parameters.

Regarding the reliability of our reference sample, we firstly chose to separate the individuals into those aged more or less than 40 years. Indeed, this value is often considered as the threshold beyond which age estimation by the different methods is inaccurate and underestimated [9–12, 29–34]. As regards our results concerning bias with mBD values, we observed a moderate overestimation for younger individuals and a very small underestimation for older individuals. This point is well supported in the literature [20, 35].

Concerning inaccuracy, we highlighted homogeneous mean absolute errors for both sexes and age groups, most of them being less than 10 years. These results are promising and could enable consideration of the use of this linear regression model for particular forensic casework. Curate et al. reported a mean absolute error of always over 10 years by applying the Fernando Castillo and Lopez Ruiz method to skeletal samples, which is barely acceptable for forensic cases [17, 24].

Moreover, we were interested in studying the potential differences between the use of HU and bone density values, specifically regarding inaccuracy and bias. Mean bone density as described seems to be the gold standard in the radiological literature [19, 20], and dual X-ray absorptiometry measurements are particularly used to quantify osteoporosis. However, HU values seem to be increasingly used in CT in regard to large-scale studies [21, 22]. Incidentally, they may be of interest in medical practice through a variety of clinical applications [36]. Whereas it seems important to consider the CT model and the kilovolt settings, which could have an effect on HU values [21, 37–39], some radiological studies have demonstrated a very substantial correlation between phantomless and phantom-based bone density values [19, 20]. Actually, we noticed almost no differences between the two groups (before and after calibration) for the reliability of

Table 2 Regression equations for females

	R	R ²	Regression equation	SEE
Before calibration	-0.69	0.48	HU = -2.15(age) + 211.67	10.36
After calibration	-0.61	0.37	mBD = -1.86(age) + 209.91	11.06

Table 3 Mean absolute error (inaccuracy) and mean error (bias) for males

Before calibration			After calibration		
Age	n	Inaccuracy	Bias	Inaccuracy	Bias
≤ 40	8	7.8	-0.9	7.4	2
> 40	52	9.8	-0.3	11.4	-0.7
Total	60	9.5	-0.4	10.8	-0.3

our sample, no matter what the age and sex of the individuals. Thus, it would not appear to be particularly necessary to use the phantoms to calibrate and normalize bone density values for age estimation. We can hypothesize that HU measurements are sufficient to link bone density with the age of individuals in forensic practice.

In this study, we used a hospital sample with living individuals to deduce bone density values from CT. For living subjects, the evolution of bone density is well known and described in the literature, depending on, among others, the age and the gender of individuals. However, with bones of cadavers, where marrow and soft tissues tend to disappear, these changes seem to be much more unpredictable. Indeed, they are prone to taphonomic alterations, such as through the action of air or putrefaction gas on the bones [40]. Similarly, it is known that radiological images, such as by CT, are often subject to artifacts that could distort bone density measurements [25].

From a significant French reference sample, this study proposes methodological and forensic benefits. On the one hand, the use of bone density, a continuous parameter, seems to be useful for age estimation because of its reproducibility. On the other hand, we report regression equations correlating bone density with the age of individuals, with a valuable level of reliability. Thus, we can hypothesize that bone density measurements could sharpen age estimation by the SB method, especially for older individuals. In addition to this possible application in forensic practice, we could also consider using this method for age estimation in living individuals. However, this point meets with some problems. Firstly, that implies the

Table 4 Mean absolute error (inaccuracy) and mean error (bias) for females

Before calibration				After calibration	
Age	n	Inaccuracy	Bias	Inaccuracy	Bias
≤ 40	18	6.9	-1.6	8.2	2.8
> 40	42	7.3	0.7	7.2	-0.06
Total	60	7.1	0.02	7.5	0.75

application of CT radiation in a non-therapeutic context which can involve some ethical issues. Secondly, in terms of accuracy, we highlighted that the SEE values appear to be very high, exceeding 8 years for males and 11 years for females, which is absolutely not acceptable in forensic practice, especially for typical legal age thresholds (between 12 and 21 years in most of the countries). Thus, in order to apply the minimum age concept [41] and avoid age overestimation in this relevant age range [16], it seems to be interesting to extend this study to a wider population and to consider many factors, such as ethnicity, physical activity, and socioeconomic status, which affect bone density changes.

To conclude, the authors suggest that age estimation could be achieved by multiple linear regression models, which may contribute to more exhaustive and accurate. Furthermore, it would be relevant to apply the regression equations obtained from our sample of virtual pubic bones to dry bones and to study other anatomical regions to link bone density with age.

Acknowledgments The authors wish to particularly thank Mrs. Agathe BASCOU and Mrs. Eulalie PEFFERKORN, students in physical anthropology at the University of Toulouse (Paul Sabatier), for participating in this work.

Authors' contribution Olivier Dubourg: conceptualization, writing—original draft, formal analysis, investigation. Marie Faruch-Bilfeld: resources, software. Norbert Telmon: supervision, validation, project administration. Pauline Saint-Martin: methodology, investigation, validation, writing—reviewing and editing. Frédéric Savall: methodology, conceptualization, validation, formal analysis, writing—reviewing and editing.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

1. Cunha E, Baccino E, Martirà L, Ramsthaler F, Prieto J, Schular Y, Lynnerup N, Cattaneo C (2009) The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic Sci Int* 193:1–13
2. Fanton L, Gustin MP, Paultre U, Schrag B, Malicier D (2010) Critical study of observation of the sternal end of the right 4th rib. *J Forensic Sci* 55:467–472
3. Ritz-Timme S, Cattaneo C, Collins MJ, Waite ER, Schütz HW, Kaatsch HJ, Borrman HIM (2000) Age estimation: the state of the art in relation to the specific demand of forensic practice. *Int J Legal Med* 113:129–136
4. Konigsberg LW, Hermann NP, Wescott DJ et al (2008) Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death. *J Forensic Sci* 53:541–557
5. Savall F, Rérolle C, Hérin F et al (2016) Reliability of the Suchey-Brooks method for a French contemporary population. *Forensic Sci Int* 266:586
6. Brooks S, Suchey JM (1990) Skeletal age determination based on the os pubis: a comparison of the Accadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods. *Hum Evol* 5:227–238
7. Todd TW (1920) Age changes in the pubic bones, I: the white male pubis. *Am J Phys Anthropol* 3:285–334
8. McKern TW, Stewart TD (1957) Skeletal age changes in young American males. *quartermaster Research and Development command technical report*. Natick, MA
9. Hoppa RD (2000) Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis. *Am J Phys Anthropol* 111:185–191
10. Schmitt A (2007) Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *Int J Osteoarchaeol* 14:1–6
11. Baccino E, Tavemier JC, Lamendin H et al (1991) Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes. *J Méd Lég Droit Méd* 34:27–33
12. Lovejoy CO, Meindl RS, Tague RG et al (1995) The senescent biology of the hominid pelvis. *Rivista di Antropologia* 73:31–49
13. Navega D, Coelho JO, Cunha E et al (2018) DXAGE: a new method for age at death estimation based on femoral bone mineral density and artificial neural networks. *J Forensic Sci* 63:2
14. Dubourg O, Faruch-Bilfeld M, Telmon N, Maupoint E, Saint-Martin P, Savall F (2019) Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample. *Forensic Sci Int* 298:345–350
15. Lopez-Alcaraz M, Garamendi Gonzalez PM, Aguilera IA et al (2015) Image analysis of pubic bone for age determination in a computed tomography sample. *Int J Legal Med* 129:335–346
16. Savall F, Hérin F, Peyron PA, Rougé D, Baccino E, Saint-Martin P, Telmon N (2018) Age estimation at death using pubic bone analysis of a virtual reference sample. *Int J Legal Med* 132:609–615
17. Castillo RF, Ruiz Mdel C (2011) Assessment of age and sex by means of DXA bone densitometry: application in forensic anthropology. *Forensic Sci Int* 209:53–58
18. Ford JM, Kumm TR, Decker SJ (2020) An analysis of Hounsfield unit values and volumetrics from computerized tomography of the proximal femur for sex and age estimation. *J Forensic Sci* 65(2):591–596
19. Budoff M, Hamirani YS, Gao YL et al (2010) Measurement of thoracic bone mineral density with quantitative CT. *Radiology* 257:434–440
20. Budoff M, Malpaso JM, Zeb I et al (2013) Measurement of phantomless thoracic bone mineral density on coronary artery calcium CT scans acquired with various CT scanner models. *Radiology* 267(3):830–836
21. Jang S, Graffy PM, Ziemslejewicz TJ, Lee SJ, Summers RM, Pickhardt PJ (2019) Opportunistic osteoporosis screening at routine abdominal and thoracic CT: normative L1 trabecular attenuation values in more than 20000 adults. *Radiology* 291:360–367
22. Zou D, Muheremu A, Sun Z et al (2020) Computed tomography Hounsfield unit-based prediction of pedicle screw loosening after surgery for degenerative lumbar spine disease. *J Neurosurg Spine* 3:1–6
23. Witt MR, Cameron JR (1970) An improved bone standard containing dipotassium hydrogen phosphate solution for the intercomparison of different bone scanning systems. US Atomic Energy Commission, Washington DC
24. Curate F, Albuquerque A, Cunha E et al (2013) Age at death estimation using bone densitometry: testing the Fernandez Castillo and Lopez Ruiz method in two documented skeletal samples from Portugal. *Forensic Sci Int* 3:296
25. Villa C, Hansen MN, Buckberry J, Cattaneo C, Lynnerup N (2013) Forensic age estimation based on the trabecular bone changes on the pelvic bone using post-mortem CT. *Forensic Sci Int* 233:393–402
26. Wade A, Nelson A, Garvin G, Holdsworth DW (2011) Preliminary radiological assessment of age-related change in the trabecular structure of the human os pubis. *J Forensic Sci* 56:312–319

27. Rougé-Maillard C, Vielle B, Jousset N, Chappard D, Telmon N, Cunha E (2009) Development of a method to estimate skeletal age at death in adults using the acetabulum and the auricular surface on a Portuguese population. *Forensic Sci Int* 188:91–95
28. Baccino E, Ubelaker DH, Hayek LA, Zerilli A (1999) Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. *J Forensic Sci* 44:931–936
29. Villa C, Buckberry J, Cattaneo C, Frohlich B, Lynnenup N (2015) Quantitative analysis of the morphological changes of the pubic symphysis face and the auricular surface and implications for age at death estimation. *J Forensic Sci* 60:556–565
30. Schmitt A (2008) Une nouvelle méthode pour discriminer les individus décédés avant ou après 40 ans à partir de la symphyse pubienne. *J Méd Leg Droit Méd* 51(1):15–24
31. Telmon N, Gaston A, Chemla P, Blanc A, Joffre F, Rougé D (2005) Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis. *J Forensic Sci* 50:507–512
32. Lottering N, MacGregor DM, Meredith M et al (2013) Evaluation of the Suchey-Brooks method of age estimation in an Australian subpopulation using computed tomography of the pubic symphyseal surface. *Am J Phys Anthropol* 150:386–399
33. Fleischman JM (2013) A comparative assessment of the Chen et al. and Suchey-Brooks pubic aging methods on a North American sample. *J Forensic Sci* 58:311–323
34. San Millan M, Rissech C, Turbon D (2013) A test of Suchey-Brooks (pubic symphysis) and Buckberry-chamberlain (auricular surface) methods on an identified Spanish sample: paleodemographic implications. *J Archaeol Sci* 40:1743–1751
35. Bocquet-Appel JP, Masset C (1996) Paleodemography: expectancy and false hope. *Am J Phys Anthropol* 99:571–583
36. Zeb I, Li D, Nasir K, Katz R, Larjani VN, Budoff MJ (2012) Computed tomography scans in the evaluation of fatty liver disease in a population based study: the multi-ethnic study of atherosclerosis. *Acad Radiol* 19(7):811–818
37. Johannesdotir F, Allaire B, Bouxsein ML (2018) Fracture prediction by computed tomography and finite element analysis: current and future perspectives. *Curr Osteoporos Rep* 16(4):411–422
38. Gausden EB, Nwachukwu BU, Schreiber JJ, Lorich DG, Lane JM (2017) Opportunistic use of CT imaging for osteoporosis screening and bone density assessment: a qualitative systematic review. *J Bone Joint Surg Am* 99(18):1580–1590
39. Engelke K, Lang T, Khosla S, Qin L, Zysset P, Leslie WD, Shepherd JA, Shousboe JT (2015) Clinical use of quantitative computed tomography-based advanced techniques in the management of osteoporosis in adults: the 2015 ISCD official positions-part III. *J Clin Densitom* 18(3):393–407
40. Egger C, Vaucher P, Doenz F, Palmiere C, Mangin P, Grabherr S (2012) Development and validation of a postmortem radiological alteration index: the RA-index. *Int J Legal Med* 126:559–566
41. Schmeling A (2019) Forensic age assessment. *Rev Esp Med Legal* 45(4):163–169

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Age estimation based on computed tomography exploration: a combined method

Agathe Bascou¹ · Olivier Dubourg² · Norbert Telmon¹ · Fabrice Dedouit¹ · Pauline Saint-Martin³ · Frédéric Savall¹

Received: 11 March 2021 / Accepted: 6 July 2021 / Published online: 30 July 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

Despite an extensive number of existing methods, age estimation of human remains is still an unsolved matter in the field of forensic anthropology, especially when it comes to mature adults. The specific aim of this work was to propose a combined method for age estimation, for forensic purposes, by coupling the Suchey–Brooks method and the measure of the pubic bone density. For this purpose, we used an independent test sample comprising 339 CT scans of living individuals aged 15 to 99 years old. Measurement of bone density and staging according to the Suchey–Brooks phases were performed, followed by estimation of ages based on a combined method and an existing virtual reference sample. Results highlighted a significant negative correlation between bone density and age. Good accuracy was obtained for the measurement of pubic bone density for age estimation of men and women, especially concerning mature adults, with an absolute error ranging from 9 to 16 years for all individuals. The authors propose a practical combined method consisting of, first, allocating phases according to the scannographic approach of the Suchey–Brooks method. For phases I to IV, the age estimation is given using the Suchey–Brooks method. For phases V to VI, the pubic bone density measurement is used. Further study will be needed to assess the reproducibility of these results on cadavers and dry bones, as the post-mortem process could interfere with the measurement of mineral bone density.

Keywords Forensic anthropology · Age-at-death · Pubic symphysis · Bone mineral density · Virtual anthropology · Suchey–Brooks method

Introduction

In forensic anthropology, estimation of age-at-death is fundamental in order to assess a biological profile of human skeletal remains or to facilitate an individual identification [1–3]. In the past century, many different methods have been developed for this purpose, mainly scales based on qualitative features analyzed on dry bones or teeth [1, 2, 4–6]. The accurate estimation of age-at-death of adults' skeletal remains still today represents

a challenge in the field. Indeed, especially in the field of forensic science, investigators seek reproducible and reliable methods with high scientific validity that can be routinely applied [1, 3, 7, 8].

The pubic symphysis is one of the most studied skeletal structures for this purpose [7]. Staging according to the Suchey–Brooks system is one of the most tested and used methodology worldwide in this matter. It is based on the macroscopic morphological analysis of the maturing and degenerative process on dry pubic symphysis, with six phases for males and females associated with an age range and mean [4, 5, 9].

In recent years, new methods to estimate age-at-death using CT scans have been developed for (1) practical and technical reasons (newly available access to CT scans for forensic purposes, greater time efficiency, and the possibility of carrying out analysis while preserving the integrity of the remains) and (2) methodological purposes such as the development of quantitative, objective, and continuous age-at-death estimation methods [7, 10–14].

✉ Agathe Bascou
agathe.bascou@gmail.com

¹ Service de Médecine Légale, Centre Hospitalier Universitaire Rangueil, 1 Avenue du Professeur Jean Poulié, TSA 50032, 31059 Toulouse Cedex 9, France

² UNAM, Service de médecine légale, Centre Hospitalier Universitaire, 4 rue Larrey, 49933 Angers Cedex 9, France

³ Institut Médico-Légal, Centre Hospitalier Régional Universitaire, 37044 Tours Cedex 9, France

In the literature, some studies have already shown the contribution of CT scans in the measurement of bone density, especially in femoral bone and in pubic symphysis [15, 16]. Indeed, it is well known in the medical field that bone density decreases with age, in addition to other factors such as hormonal status, genetics, or biomechanical forces [15, 17, 18]. Bone mineral density seems like a potential objective and continuous parameter that could be of interest in the process of securing accurate age-at-death estimation of adults' skeletal remains.

Furthermore, as highlighted in a previous study, it could be part of a two-scale method coupling the qualitative approach of the Suchey–Brooks method transposed onto CT scans with the measurement of the bone density of the pubic symphysis bringing additional data in age-at-death estimation [16]. Indeed, it has already been proposed that coupling methods could enhance the accuracy of age estimation [19].

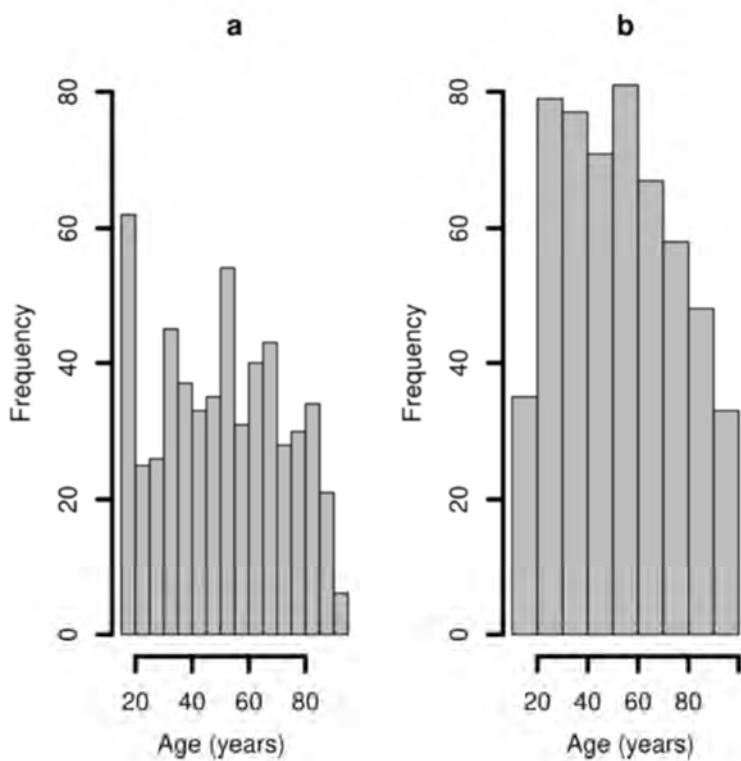
The specific aim of this work was to propose a method for estimation of age-at-death, combining the Suchey–Brooks method and the measurement of pubic bone density on CT scans.

Materials

Reference sample

The reference sample used in this work is a previously published by Savall et al. virtual sample of pubic bone comprising 550 males (mean age = 51.01 years; minimum age = 15 years; maximum age = 92 years; and standard deviation = 21.55 years) and 549 females (mean age = 53.14 years; minimum age = 15 years; maximum age = 100 years; and SD = 22.72 years) undergoing clinical multi-slice computed tomography (MSCT) in two hospitals in France (Toulouse and Tours) between January 2013 and July 2014 in a similar context, as described below for the test sample (Fig. 1). For all the individuals, a Suchey–Brooks phase has been assigned after reconstruction and virtual examination of the left side of the pubic bone by Savall et al. [20]. The measurement of the pubic bone density has been carried out following the same method as described below for the test sample.

Fig. 1 Histogram showing the distribution by age of the reference sample for males (a) and females (b)



Study sample

The study sample comprised pubic bones from male and female individuals undergoing clinical MSCT in Toulouse (France) between November 2017 and April 2018. MSCT was mainly requested in the clinical context of general condition alteration or abdominal diseases. Patients with a known history of bone disease or pelvic trauma and patients with materials causing artifacts such as hip replacements were excluded.

The Suchey–Brooks phase allocation was allocated for everyone based on examination of the left side of the pubic bone by a different observer following the same method as developed by Savall et al. [20]. The left side of the pubic bone was chosen due to the reference sample's available data.

A total of 191 males (mean age = 58.59 years; minimum age = 17 years; maximum age = 94 years, and standard deviation = 17.17 years) and 148 females (mean age = 59.72 years; minimum age = 15 years; maximum age = 99 years, and standard deviation = 19.41 years) were recorded (Fig. 2).

MSCT images were obtained through a Picture Archiving and Communication System (PACS, McKesson Medical

Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by the hospital of Toulouse and Tours (France). Acquisitions were performed on a Sensation 16 Scanner (Siemens, Erlangen, Germany) with 16×1.5 collimation. The image matrix was 512×512 pixels. A soft tissue filter was used, and axial reconstructions were performed every 2 mm.

CT scans were saved as digital imaging and communications in medicine (DICOM) files.

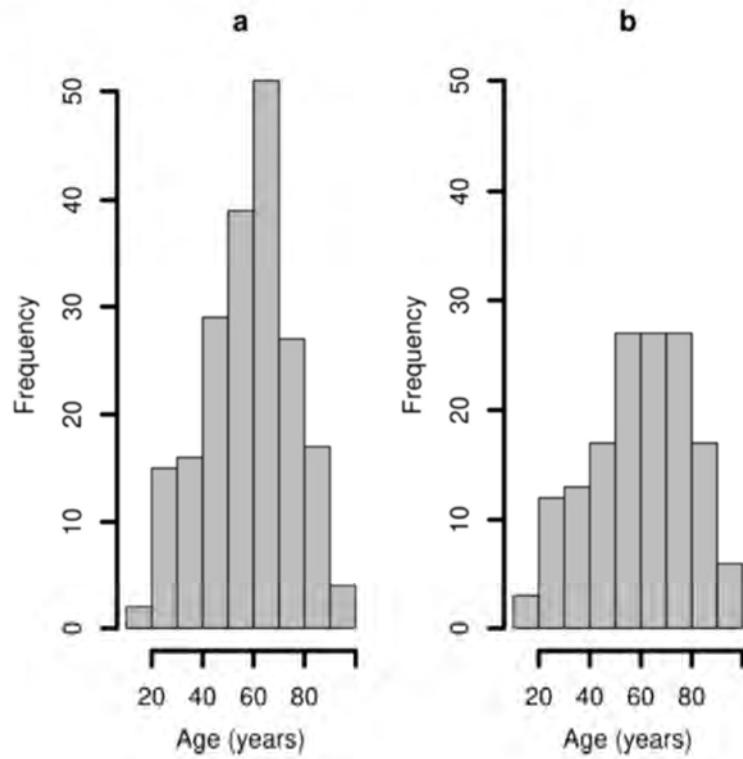
According to French law, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without the patient's consent when these examinations have been carried out for clinical purposes and have been recorded anonymously (article 40–1, laws 94–548 of July 1, 1994).

Methods

Data recovery

Images were analyzed and measurements made using RadiAnt software (RadiAnt DICOM Viewer 64-bit). Density values were in Hounsfield Units (HU).

Fig. 2 Histogram showing the distribution by age of the study sample for males (a) and females (b)



Measures of density

The pubis bone measurements were performed on an axial plane on the left side of the pubis symphysis. A bone tissue filter was used. The reference place for measurements was defined by the slice where the articular surface of the pubis seemed the largest. A measurement corresponding to the larger circle placed in the center of the cancellous bone without reaching cortical bone was performed on the left pubic bone (Fig. 3).

Phase staging of the pubic bone

The scoring method of the pubic bone was replicated and applied unaltered from Savall et al. [20]. Reconstruction of the surface was carried out using Amira 5.4.2 software (Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA). A phase was assigned to each pubic bone using the Suchey–Brooks system [4].

Statistical analysis

All statistical analyses and graphical representations were carried out with R 3.6.2 software (R Development Core Team, <http://www.R-project.org>).

Intra- and inter-observer reliability of the bone density measurements and the Suchey–Brooks staging have been tested. One month after the first measurements, the principal observer (A.B.) carried out a second measurement of 50 randomized individuals (25 males and 25 females). A second experimenter (F.S.) carried out one measurement on the same 50 individuals. The intraclass correlation coefficient (ICC) was calculated on the density values in HU. Weighted Cohen's kappa was calculated for the Suchey–Brooks method.

A correlation test (Pearson test) was applied between the bone density measurement values and age of individuals of the reference sample to determine a relationship between the two parameters. The residual analysis was performed to assess the appropriateness of the test. A linear regression formula was applied between the bone density values and age to obtain an estimated age for all samples. The linear regression curve was constructed with 95% confidence intervals and prediction intervals.

The linear regression was obtained by the formula:

$$\text{estimateAge}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{BD}_i$$

where β_0 is the intercept, β_1 is the gradient, and BD is the bone density.

We estimated the age of the individual of the test sample with both methods (Suchey–Brooks method and bone density method).

We proposed a combined method in which:

- 1) We divided our sample into two sub-samples in accordance with the Suchey–Brooks staging method (phases I to IV and phases V to VI),
- 2) We used for the first sub-sample (phases I–IV of Suchey–Brooks) the Suchey–Brooks staging method,
- 3) We used for the second sub-sample (phases V–VI of Suchey–Brooks) the method based on the bone density linear regression formula based on the individual's phases V and VI of Suchey–Brooks in the reference sample.

The relative error (bias) and absolute error (inaccuracy) of the estimated age of individuals were calculated for males and females of the test sample for the three methods of age estimation.

The relative and absolute error, respectively, were calculated based on the formula:

$$\text{Relative error} = \sum \frac{\text{estimateAge} - \text{Age}}{n}$$

$$\text{Absolute error} = \sum \left| \frac{\text{estimateAge} - \text{Age}}{n} \right|$$

Results

Intra- and inter-observer reliability

The ICC values were above 0.95 for both intra- and inter-observer reliability of the bone density measurements for males and females ($p < 0.0001$).

Kappa values were respectively of 0.93 and 0.88 for intra- and inter-observer reliability of the pubic bones staging for males and of 0.93 and 0.76 for females ($p < 0.0001$).



Fig. 3 Measurements of bone density on left pubis with RadiAnt software

Pearson's correlation between bone density and age

The results revealed a significant negative correlation between bone density and age for male (correlation coefficient = -0.72 ; coefficient of determination (R^2) = 0.52 ; and p -value <0.0001) and female individuals (correlation coefficient = -0.74 ; coefficient of determination (R^2) = 0.55 ; and p -value <0.0001).

The linear regression based on the whole reference sample was obtained by the formula:

$$\text{For males : } \text{estimateAge}_i = 79.8 - 0.28BD_i$$

$$\text{For females : } \text{estimateAge}_i = 81.61 - 0.22BD_i$$

The linear regression based on individuals of the reference sample phases V and VI of Suchey–Brooks only was obtained by the formula:

$$\text{For males (309 individuals) : } \text{estimateAge}_i = 79.44 - 0.14BD_i$$

$$\text{For females (294 individuals) : } \text{estimateAge}_i = 83.94 - 0.19BD_i$$

The results revealed a significant negative correlation between bone density and age for male individuals of the reference sample phases V and VI of Suchey–Brooks (correlation coefficient = -0.53 ; coefficient of determination (R^2) = 0.28 ; and p -value <0.0001) and female individuals of the reference sample phases V and VI of Suchey–Brooks (correlation coefficient = -0.65 ; coefficient of determination (R^2) = 0.43 ; p -value <0.0001).

Calculation of inaccuracy and bias between real and estimated ages on an independent test sample

The relative error (bias) and absolute error (inaccuracy) of the estimated age of individuals were calculated for males and females of the test sample based on the estimated age calculated with Suchey–Brooks phase staging (the estimated

age was considered as the mean age of the determined phase) and bone density linear regression formulas. The results are presented in Tables 1 and 2.

We then applied combined methods, first dividing our sample into two sub-samples, the first corresponding to individuals from phases I to IV of Suchey–Brooks and the second corresponding to individuals from phases V and VI of Suchey–Brooks. Afterwards, we applied the Suchey–Brooks age estimation method for the first sub-sample and the bone density method for the second sub-sample. The absolute and relative errors were calculated with the same formula seen above. The results are presented in Tables 3 and 4.

Discussion

It is well known in the medical field that bone density decreases with age. A few studies have already linked bone density measurement and age estimation [15, 16, 21, 22]. Indeed, bone density presents multiple advantages for age estimation: known relationship with age, continuous parameter, and accessibility of the measurement without denaturing the remain thanks to imaging. Our study used scan measurement of pubic bone density measured in Hounsfield Units. Hounsfield Units are frequently used in the measurement of bone density by radiologists and are generally accepted as a good approximation of the bone mineral density [16, 23–26]. Furthermore, previous studies using bone density measurement in CT scans for age estimation showed very good intra- and inter-observer variability in favor of the reproducibility of this method [16].

In this article, we reported a correlation coefficient value between bone density and age at -0.72 for male and -0.74 for female individuals. Our results were better than in another French study linking pubic bone density scan measurement and age estimation (-0.62 for males and -0.55 for females) [16]. In the literature, slightly better results were found using the area of Ward in the femur, with a correlation

Table 1 Absolute errors (inaccuracy) and relative errors (bias) in 10-year intervals (individuals under 34 years and over 85 years were grouped) for males. The estimated age (years) of individuals in the test sample was considered as the mean age of the determined phase by the Suchey–Brooks method (Suchey–Brooks) and was obtained according to a linear regression formula based on the measurement of bone density in the reference sample (bone density)

	Males						N	
	Suchey–Brooks			Bone density				
	Inaccuracy	Bias	Maximum inaccuracy	Inaccuracy	Bias	Maximum inaccuracy		
≤ 34	11.0	10.8	31	25.9	25.9	40.1	24	
35–44	9.5	8.7	34.8	17.0	17.0	27.5	19	
45–54	9.0	-1.7	17.1	13.2	13.2	23.4	31	
55–64	12.4	-7.8	20.4	7.3	4.2	23.3	38	
65–74	16.7	-15.9	29.4	6.1	-1.9	16.3	40	
75–84	20.1	-20.1	39.4	9.7	-9.3	26.4	32	
≥ 85	21.5	-21.5	34	19.0	-19.0	31.1	7	
Entire	14.0	-7.1	39.4	12.1	5.3	40.1	191	

Table 2 Absolute errors (inaccuracy) and relative errors (bias) in 10-year intervals (individuals under 34 years and over 85 years were grouped) for females. The estimated age (years) of individuals in the test sample was considered as the mean age of the determined phase by the Suchey–Brooks method (Suchey–Brooks) and was obtained according to a linear regression formula based on the measurement of bone density in the reference sample (bone density)

	Females			Bone density			N	
	Suchey–Brooks			Bone density				
	Inaccuracy	Bias	Maximum inaccuracy	Inaccuracy	Bias	Maximum inaccuracy		
≤ 34	11.9	10.4	25.2	20.5	19.7	36.8	17	
35–44	10.4	8.3	35.8	14.0	13.7	32.1	22	
45–54	7.1	1.3	26.8	14.2	9.3	41.6	17	
55–64	12.4	−2.7	29	9.0	6.1	20.2	26	
65–74	12.5	−2.5	25.8	6.1	0.1	15.0	28	
75–84	12.1	−8.9	35.8	4.8	−3.7	13.8	24	
≥ 85	11.2	−11.2	27.9	13.2	−13.2	26.8	14	
Entire	11.3	−0.9	35.8	10.8	4.6	41.6	148	

coefficient value between bone mineral density and age at -0.76 (only women) [15]. However, bone density remains rarely used in age estimation.

Our work showed good accuracy of the measurement of pubic bone density in age estimation of men and women aged 55 years and above with an absolute error ranging from 6 to 9 years in individuals aged 55 to 85 years old. For individuals above 85 years old, the results were weak for men (absolute error close to 19 years) and moderate for women (absolute error close to 13 years). One explanation of this phenomenon could be a bias due to the different age distribution of our test sample and especially the lack of individuals aged over 85 years old. Nevertheless, these results were superior in accuracy compared to results we obtained using the Suchey–Brooks method alone for elderly individuals. However, in young individuals, the bone density method alone showed weak results. These results are not common among age estimation methods, which usually present higher accuracy in young individuals [1]. Similar findings concerning poorer results in age estimation using the bone density of young adults compared to mature adults were found in a

previous study, which measured the bone mineral density at Ward's area in the femur [21]. Similar results were found in the literature concerning aging mature adults [8]. The higher inaccuracy rate could also be, at least partially, explained by the small size of our test sample especially in male individuals older than 85 years old, in which our results were the weakest. To test this possible bias, it would be needed to test the method on a larger test sample with similar age distribution.

Nevertheless, this work presents some limitations. First, for methodological purposes, this preliminary study was conducted on living patients and not on human remains. Therefore, further study will be needed to assess the reproducibility of these results on cadavers and dry bones, as post-mortem processes such as decomposition of the body and taphonomy could interfere with the mineral bone density measured value. According to the literature in the forensic field, gas from putrefaction, especially, could modify the structure of trabecular bone, which might affect the bone density measurement [27, 28]. The assessment of the reproducibility of the method could especially bring difficulties in

Table 3 Absolute errors (inaccuracy) and relative errors (bias) in 10-year intervals (individuals under 34 years and over 85 years were grouped) for males. The estimated age (years) was obtained as the mean age of the determined phase by the Suchey–Brooks method for individuals phases I to IV and with a linear regression formula based on the measurement of bone density of individuals phases V and VI in the reference sample for individuals phases V and VI, conjointly (combined method)

	Males					N	
	Combined method			Bias			
	Inaccuracy	Mean	Maximum	95% confidence interval	Mean		
≤ 34	10.9	29.1	[8.1; 13.8]	10.7	[7.7; 13.7]	24	
35–44	11.2	31.8	[5.1; 17.3]	10.4	[4.0; 16.9]	19	
45–54	11.7	25.4	[9.2; 14.2]	0.9	[−4.2; 5.9]	31	
55–64	13.1	20.4	[11.5; 14.8]	−6.4	[−10.6; −2.2]	38	
65–74	14.6	29.4	[11.2; 18.0]	−12.1	[−16.4; −7.7]	40	
75–84	14.4	39.4	[9.5; 19.2]	−13.9	[−18.9; −8.8]	32	
≥ 85	16.8	25.8	[10.8; 22.9]	−16.8	[−22.9; −10.8]	7	
Entire	13.1	39.4	[11.7; 14.4]	−4.2	[−6.4; −2.0]	191	

Table 4 Absolute errors (inaccuracy) and relative errors (bias) in 10-year intervals (individuals under 34 years and over 85 years were grouped) for females. The estimated age (years) was obtained as the mean age of the determined phase by the Suchey–Brooks method for individuals phases I to IV and with a linear regression formula based on the measurement of bone density of individuals phases V and VI in the reference sample for individuals phases V and VI, conjointly (combined method)

	Females					N	
	Combined method			Bias			
	Inaccuracy		95% confidence interval	Mean	95% confidence interval		
	Mean	Maximum		Mean	95% confidence interval		
≤ 34	11.9	25.2	[7.8; 16.1]	10.4	[5.2; 15.6]	17	
35–44	9.2	28.2	[6.2; 14.7]	7.1	[3.2; 13.5]	22	
45–54	8.2	26.7	[3.1; 11.1]	2.4	[−4.1; 6.7]	17	
55–64	13.5	29.0	[9.3; 15.5]	−1.4	[−8.6; 3.1]	26	
65–74	10.5	25.8	[10.5; 14.6]	−0.5	[−7.7; 2.8]	28	
75–84	9.3	35.8	[6.5; 17.6]	−6.8	[−15.5; −2.3]	24	
≥ 85	10.2	22.4	[7.6; 14.8]	−10.2	[−14.8; −7.6]	14	
Entire	10.5	35.8	[9.9; 12.7]	0.1	[−3.2; 1.5]	148	

long post-mortem delay, such as dry bones. However, bone mineral density is a measure of minerals (mostly calcium) contained in a certain volume of bone. In immediate post-mortem cases, before skeletonization of the corpse, there is no known immediate fluctuation in the calcium rate [28, 29]. The measurement of bone density for age estimation should therefore be reproducible in immediate post-mortem cases and applicable in most forensic contexts.

Secondly, the study was based on individuals undergoing clinical MSCT in the context of general alteration or abdominal disease in a French population, which creates a selection bias, even though the patients did not necessarily suffer from any chronic diseases and in this sense could be considered as naturally diversified, minimizing the bias. Nevertheless, further study on different populations will be needed to test the reproducibility of these results, as well as in populations with different ancestry. Indeed, although it is known that bone density decreases with age in all populations, it can vary from individuals and populations and is also influenced by environmental factors and genetics [18, 30].

Furthermore, our test sample shows different age distribution and especially lack of individuals over 85 years old which could create a bias and overestimate inaccuracy for this age group. Therefore, it will be valuable to test the method on a larger sample with similar age distribution.

Nevertheless, this study used a robust previously published reference sample which is a valuable strength for the method. It provided an additional test of this virtual reference sample of the pubic bone, providing accurate results in age estimation on virtual imaging with the Suchey–Brooks method [7, 20]. It is indeed important in the field to continue testing new samples, especially of different populations with different ancestries.

Many authors recommend using multifactorial methods when estimating the age of human remains,

as no method is currently available which provides good accuracy for the entire life span [1, 19]. Baccino et al. proposed a “two-step procedure” based on the Suchey–Brooks and the Lamendin methods, based on the same assumption that the Suchey–Brooks method is reliable for young adults but weak in age estimation for mature adults [19]. The method proposed here was based on the same assumption that it is needed to use more than one method to provide an accurate age estimation for the entire adult life span. However, we chose to develop a method studying two different approaches on the same anatomical segment, while the “two-step procedure” proposed to use two methods studying two different anatomical segments [19].

The Suchey–Brooks method is a well-known and frequently used method in the field for age estimation of human remains using the pubic bone symphysis [1, 2, 20]. Nevertheless, this method, as most available methods, is a qualitative approach that disregards the continuous age parameter and shows weakness in age estimation for elderly individuals. Previous studies proposed a scannographic approach of the Suchey–Brooks method in order to facilitate the use of the method in a forensic context, as soft tissues are often found on the remains [20, 31].

Therefore, we proposed a practical method consisting of:

- 1) Assigned a phase based on the scannographic approach of the Suchey–Brooks method; the individual is classified as “young adult” if he or she has been assigned phase I, II, III, or IV and “mature adult” if he or she has been assigned phase V or VI using the Suchey–Brooks method;
- 2) For individual phases I–IV, the age estimate is given using the Suchey–Brooks method;

- 3) For individual phases V–VI, the pubis bone density measurement can be used to estimate age according to the regression formulas provided above.

Indeed, the Suchey–Brooks criteria for phase assignment are based on maturation criteria for young adults (phases I to IV of Suchey–Brooks) and on degenerative processes for mature adults (phases V and VI of Suchey–Brooks), therefore showing weakness in age estimation for the latter group. Bone density, on the other hand, shows good accuracy in age estimation for mature individuals, as shown in previous work [21]. Therefore, in our method, we chose as a cutoff the phase IV of Suchey–Brooks to improve the accuracy of the method for individuals phases V and VI of Suchey–Brooks. Indeed, our combined method provides good general accuracy in age estimation of young and mature adults, with absolute error ranging from 8 to 13 years for females and 10 to 16 years for males. These results were slightly less accurate for young individuals than historical methods of age estimation, but they proved to be more accurate for mature individuals, providing a simple method that permits age estimation for young and mature adults alike [8, 20]. Similar observations were found comparing our results with Savall et al. in which the same reference sample and the Suchey–Brooks method were used for age estimation [20]. Indeed, they showed slightly more accurate results for younger individuals (under 55 years old) with an absolute error ranging from 5 to 9 years for males and 1 to 14 years for females while our study shows weaker results with an absolute error ranging from 10 to 11 for males and 8 to 11 for females [20], whereas our method present more accurate results for individuals over 55 years old with absolute errors ranging from 13 to 16 years for male and 9 to 13 years for female individuals while Savall et al. found for a similar age group absolute errors ranging from 14 to 33 years for males and 10 to 22 years for females [20]. Indeed, as previously observed in many age estimation methods, the bone density technique tends to overestimate age in young adults and underestimate it in mature adults [21]. This can be explained by a statistical bias secondary to the age distribution of the reference sample, with a regression to the mean [32, 33]. With our combined method, this bias is reduced, allowing a smoothening of the error for all adult individuals.

We propose here a practical, combined method, easily performed with CT scans, for age assessment in the forensic context, with no need for a long preparation process for dry bone. The method still needs to be tested on a cadaver collection, as bone density can be modified by post-mortem processes. However, our method showed promising results in aging the adult's life span and especially for mature adults above 55 years old, which remains a complex and frequently encountered issue in the field.

Author contributions All authors contributed to the study's conception and design. Material preparation, data collection, and analysis were performed by Agathe Bascou, Olivier Dubourg, and Pauline Saint-Martin. The first draft of the manuscript was written by Agathe Bascou, and all authors commented. All authors read and approved the final manuscript.

Availability of data and material The data sets generated and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Ethics approval Not applicable.

Consent to participate Not applicable.

Consent for publication Not applicable.

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

1. Cunha E, Baccino E, Martrille L et al (2009) The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic Sci Int* 193:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.09.008>
2. Baccino E, Ubelaker DH, Hayek LA, Zerilli A (1999) Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. *J Forensic Sci* 44:931–936
3. Konigsberg LW, Herrmann NP, Wescott DJ, Kimmerle EH (2008) Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death. *J Forensic Sci* 53:541–557. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00710.x>
4. Brooks S, Suchey JM (1990) Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Hum Evol* 5(3):227–238. <https://doi.org/10.1007/BF02437238>
5. Todd TW (1920) Age changes in the pubic bone. I. The male white pubis. *Am J Phys Anthropol* 3:285–334. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330030301>
6. Fanton L, Gustin M-P, Paultre U et al (2010) Critical study of observation of the sternal end of the right 4th rib. *J Forensic Sci* 55:467–472. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01279.x>
7. Savall F, Rérolle C, Hérin F et al (2016) Reliability of the Suchey-Brooks method for a French contemporary population. *Forensic Sci Int* 266:586.e1–586.e5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.04.030>
8. Schmitt A (2004) Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *Int J Osteoarchaeol* 14:1–6. <https://doi.org/10.1002/oa.693>
9. McKern T, Stewart TD (1957) Skeletal age changes in young American males, analyzed from the standpoint of age identification. Technical report EP-45, quartermaster research & development center, environmental protection research division, viii, pp. 179, 87 figures, 52 tables
10. Villa C, Buckberry J, Cattaneo C, Lynnerup N (2013) Technical note: reliability of Suchey-Brooks and Buckberry-Chamberlain methods on 3D visualizations from CT and laser scans. *Am J Phys Anthropol* 151:158–163. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22254>
11. Wade A, Nelson A, Garvin G, Holdsworth DW (2011) Preliminary radiological assessment of age-related change in the trabecular

- structure of the human os pubis. *J Forensic Sci* 56:312–319. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01643.x>
12. Villa C, Buckberry J, Cattaneo C et al (2015) Quantitative analysis of the morphological changes of the pubic symphyseal face and the auricular surface and implications for age at death estimation. *J Forensic Sci* 60:556–565. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12689>
 13. Dedouit F, Savall F, Mokrane F-Z et al (2014) Virtual anthropology and forensic identification using multidetector CT. *Br J Radiol* 87:20130468. <https://doi.org/10.1259/bjr.20130468>
 14. Pasquier E, Pernot DSM, L, Burdin V, et al (1999) Determination of age at death: assessment of an algorithm of age prediction using numerical three-dimensional CT data from pubic bones. *Am J Phys Anthropol* 108:261–268. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199903\)108:3<261::AID-AJPA2>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199903)108:3<261::AID-AJPA2>3.0.CO;2-B)
 15. Navega D, d'Oliveira CJ, Cunha E, Curate F (2018) DXAGE: A new method for age at death estimation based on femoral bone mineral density and artificial neural networks. *J Forensic Sci* 63:497–503. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13582>
 16. Dubourg O, Faruch-Bilfield M, Telmon N et al (2019) Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample. *Forensic Sci Int* 298:345–350. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.03.018>
 17. Virtama P (1969) Radiographic measurements of cortical bone ; variations in a normal population between 1 and 90 years of age, *Acta radiologica supplementum* 293, Stockholm, Acta Radiol pp. 268, 15 figures, 108 tables
 18. Mays S (2015) The effect of factors other than age upon skeletal age indicators in the adult. *Ann Hum Biol* 42:332–341. <https://doi.org/10.3109/03014460.2015.1044470>
 19. Baccino E, Sinfield L, Colomb S et al (2014) Technical note: the two step procedure (TSP) for the determination of age at death of adult human remains in forensic cases. *Forensic Sci Int* 244:247–251. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.09.005>
 20. Savall F, Hérin F, Peyron PA et al (2018) Age estimation at death using pubic bone analysis of a virtual reference sample. *Int J Legal Med* 132:609–615. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1656-9>
 21. Curate F, Albuquerque A, Cunha EM (2013) Age at death estimation using bone densitometry: testing the Fernández Castillo and López Ruiz method in two documented skeletal samples from Portugal. *Forensic Sci Int* 226:296.e1–296.e6. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.12.002>
 22. Castillo RF, CLópez Ruiz Mdel (2011) Assessment of age and sex by means of DXA bone densitometry: application in forensic anthropology. *Forensic Sci Int* 209:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.12.008>
 23. Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG et al (2011) Hounsfield Units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management. *J Bone Jt Surg Am* 93:1057–1063. <https://doi.org/10.2106/JBJS.J.00160>
 24. Schreiber JJ, Anderson PA, Hsu WK (2014) Use of computed tomography for assessing bone mineral density. *Neurosurg Focus* 37:E4. <https://doi.org/10.3171/2014.5.FOCUS1483>
 25. Anderson PA, Polly DW, Binkley NC, Pickhardt PJ (2018) Clinical use of opportunistic computed tomography screening for osteoporosis. *J Bone Jt Surg Am* 100:2073–2081. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01376>
 26. Lee S, Chung CK, Oh SH, Park SB (2013) Correlation between bone mineral density measured by dual-energy x-ray absorptiometry and Hounsfield Units measured by diagnostic CT in lumbar spine. *J Korean Neurosurg Soc* 54:384. <https://doi.org/10.3340/jkns.2013.54.5.384>
 27. Egger C, Vaucher P, Doenz F et al (2012) Development and validation of a postmortem radiological alteration index: the RA-Index. *Int J Legal Med* 126:559–566. <https://doi.org/10.1007/s00414-012-0686-6>
 28. Bell L, Skinner M, Jones S (1996) The speed of post mortem change to the human skeleton and its taphonomic significance. *Forensic Sci Int* 82:129–140. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(96\)90198-6](https://doi.org/10.1016/0379-0738(96)90198-6)
 29. Zhu B-L, Ishikawa T, Quan L et al (2005) Evaluation of postmortem serum calcium and magnesium levels in relation to the causes of death in forensic autopsy. *Forensic Sci Int* 155:18–23. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.10.016>
 30. Hoppa RD (2000) Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis. *Am J Phys Anthropol* 111:185–191. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(200002\)111:2<185::AID-AJPA5>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(200002)111:2<185::AID-AJPA5>3.0.CO;2-4)
 31. Telmon N, Gaston A, Chemla P et al (2005) Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis. *J Forensic Sci* 50:507–512
 32. Bocquet-Appel JP, Masset C (1996) Paleodemography: expectancy and false hope. *Am J Phys Anthropol* 99:571–583. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199604\)99:4<571::AID-AJPA4>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199604)99:4<571::AID-AJPA4>3.0.CO;2-X)
 33. Konigsberg LW, Frankenberg SR (1992) Estimation of age structure in anthropological demography. *Am J Phys Anthropol* 89:235–256. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330890208>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

IX-2. Annexe 2 : Travail intermédiaire concernant la variabilité inter-observateurs lors de l'application de la méthode de Brooks et Suchey

La revue de médecine légale (2020) 11, 74–80



Available online at
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



ORIGINAL ARTICLE

Inter-observer agreement of the Suchey-Brooks method from a French computed tomography sample



Accord inter-observateurs lors de l'application de la méthode de Suchey-Brooks à partir d'un échantillon scanographique

O. Dubourg^{a,b,*}, R. Toutin^c, A. Bascou^c, N. Jousset^b,
N. Telmon^a, P. Saint-Martin^{a,d}, F. Savall^{a,c}

^aAMIS FRE 2960 CNRS, laboratoire d'anthropologie moléculaire et d'imagerie de synthèse, université Toulouse III, 37, allées Jules-Guesde, 31000 Toulouse, France

^bUNAM, service de médecine légale, centre hospitalier universitaire, 4, rue Larrey, 49933 Angers cedex 9, France

^cService de médecine légale, centre hospitalier universitaire de Rangueil, 1, avenue du Professeur-Jean-Poulhès, 31059 Toulouse cedex 9, France

^dInstitut médico-légal, centre hospitalier régional universitaire, 37044 Tours cedex 9, France

Available online 11 April 2020

KEYWORDS

Forensic anthropology;
Suchey-Brooks method;
Age estimation;
Inter-observer
agreement

Abstract

Aim of the work. – In forensic anthropology, the estimation of age at death is required to establish a biological profile and facilitate individual identification. The pubic symphysis represents one of the most studied skeletal structures due to its late maturation. In this respect, the Suchey-Brooks (SB) system is one of the most commonly used methods of assessment based on the morphological characteristics of the pubic symphysis. However, the SB method has certain drawbacks, including frequently inaccurate estimation for individuals over 40 years old. The main aim of this work was to study the inter-observer agreement in the SB method then to test the errors of estimation by three observers with heterogeneous experience from a computed tomography sample for individuals aged between 15 and 98 years old.

Patients and methods. – We retrospectively studied public bones from 50 males and 50 females undergoing clinical multislice computed tomography (MSCT) in a French hospital between November 2017 and April 2018.

Results. – The inter-observer reliabilities, with or without the early and advanced patterns, were excellent between the observers (kappa values between 0.8 and 0.95). By focusing on the first three phases (I–III) versus the last three phases (IV–VI), there was no significant difference

* Corresponding author at: UNAM, service de médecine légale, centre hospitalier universitaire, 4, rue Larrey, 49933 Angers cedex 9, France.
E-mail address: olivierdub@hotmail.fr (O. Dubourg).

MOTS CLÉS
 Anthropologie médico-légale ;
 Méthode Suchey-Brooks ;
 Estimation de l'âge ;
 Accord inter-observateurs

between the inter-observer reliabilities (kappa values between 0.44 and 0.85).
Conclusion. — The inaccuracy rose with age, showing a growing underestimation from 40 years old and beyond. Besides, we highlighted a moderate overestimation for younger individuals. These errors of estimation were slightly dependent on the experience of the observer.
 © 2020 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Résumé

But de l'étude. — En anthropologie médico-légale, l'estimation de l'âge au décès est primordiale afin d'établir un profil biologique et faciliter l'identification de l'individu. La symphise pubienne représente l'une des structures osseuses les plus étudiées du fait de sa maturation tardive. À ce titre, la méthode de Suchey-Brooks (SB) est l'une des méthodes d'estimation les plus utilisées, se basant sur les caractéristiques morphologiques de la symphise pubienne. Cependant, cette méthode comporte certains inconvénients, incluant une estimation imprécise chez les individus âgés de plus de 40 ans. Le principal objectif de ce travail était d'étudier l'accord inter-observateurs ainsi que les erreurs d'estimation lors de l'application de la méthode de Suchey-Brooks par trois observateurs d'expérience différente, à partir d'un échantillon scanographique d'individus âgés de 15 à 98 ans.

Patients et méthodes. — Nous avons étudié rétrospectivement les pubis de 50 hommes et 50 femmes ayant bénéficié d'un examen scanographique dans un hôpital français entre novembre 2017 et avril 2018.

Résultats. — Les variabilités inter-observateurs, avec ou sans la prise en compte des sous-stades précoces et tardifs, étaient excellentes entre les observateurs (coefficients kappa entre 0,8 et 0,95). En mettant en exergue les trois premières phases d'un côté (I–III) et les trois dernières de l'autre (IV–VI), il n'y avait pas de différence significative entre les différentes variabilités inter-observateurs (coefficients kappa entre 0,44 et 0,85).

Conclusion. — Le degré d'imprécision augmentait avec l'âge, illustré notamment par une sous-estimation croissante de l'âge des individus de 40 ans et plus. Par ailleurs, nous avons mis en évidence une surestimation modérée pour les individus plus jeunes. Ces erreurs d'estimation étaient légèrement dépendantes de l'expérience de l'observateur.

© 2020 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Introduction

In forensic anthropology, the estimation of age at death is mainly required to establish a biological profile and facilitate individual identification [1–3]. The pubic symphysis represents one of the most studied skeletal structures due to its late maturation [4]. In this respect, the Suchey-Brooks (SB) system is one of the most commonly used and tested methods of assessment based on the morphological characteristics of the pubic symphysis [5–7].

However, the SB method has certain drawbacks, including frequently inaccurate estimation for individuals over 40 years old [8–11]. The inter-observer reliability is largely described in the literature, highlighting some various results [12,13]. Indeed, we witnessed in the different previous studies that calculation methods would never differentiate the maturation phases from the degeneration ones.

The aim of this work was to study the inter-observer agreement of the SB method among three observers with heterogeneous experience from a computed tomography sample by focusing on the first three phases and the last three phases in the SB method. Moreover, we intended to test the errors of estimation in the three observers by calculating inaccuracy and bias.

Materials and methods

Sample

We undertook a retrospective study of pubic bones from male and female adults undergoing clinical multi-slice computed tomography (MSCT) in a hospital in Toulouse, France, between November 2017 and April 2018. MSCT was mainly requested in the clinical context of general condition alteration or suspicion of abdominal diseases. Patients with a known history of bone disease or pelvic trauma as well as patients with materials causing artifacts, such as hip replacements, were excluded. We hypothesized that the SB method could be applied for both dry bones and CT images without any differences. In order to constitute the sample, a confirmed experimenter preliminarily performed phase allocation of many symphyseal faces of pubic bones using morphological criteria of the SB system [5]. As described in this method, the phases are defined as follows:

- Phase I.

Symphyseal face has a billowing surface with ridges and furrows which usually extends to include the pubic tubercle, the horizontal ridges are well-marked and ven-

tral beveling may be commencing with a lack of delimitation of either extremity;

- Phase II.

Symphyseal face may still show ridge development, the face has commencing delimitation of lower and/or upper extremities occurring with or without ossific nodules, and the ventral rampart may be in beginning phases as an extension of the bony activity at either or both extremities;

- Phase III.

Symphyseal face is smooth and shows lower extremity and ventral rampart in process of completion, dorsal plateau is complete and there is no tipping of symphyseal dorsal margin and bony ligamentous outgrowths;

- Phase IV.

Symphyseal face is generally fine grained and usually the oval outline is complete at this stage, but a hiatus can occur in upper ventral rim;

- Phase V.

Symphyseal face is completely rimmed with some slight depression of the face itself, relative to the rim, moderate tipping is usually found on the dorsal border with more prominent ligamentous outgrowths on the ventral border;

- Phase VI.

Symphyseal face may show ongoing depression as rim erodes, ventral ligamentous attachments are marked, crenulations may occur and the shape of the face is often irregular at this stage [5].

Within each of the six usual phases (I to VI), the early

pattern and the advanced pattern were separated [5]. This step enabled the creation of a stage-balanced sample that consisted of a total of 50 males (mean age 40.1 years; median age 33 years; minimum age 15 years; maximum age 84 years; SD 22) and 50 females (mean age 46.6 years; median age 42 years; minimum age 15 years; maximum age 98 years; SD 25.2) (Fig. 1).

According to French law, as well as the patient's non-objection, the results of medical imaging examinations may be used retrospectively without their consent when these examinations have been conducted for clinical purposes and when they have been recorded anonymously (Article 40-1, Law 94-548 of 1 July 1994).

MSCT

MSCT images were obtained through a Picture Archiving and Communication System (PACS, McKesson Medical Imaging Group, Richmond, BC, Canada) used by the hospital. Examinations were performed on an Optima 64-detector row CT scanner (General Electric Medical Systems). The image matrix was 512 × 512 pixels. A soft tissue filter was used and axial reconstructions were performed every 1.25 mm with a 1.25 mm slice thickness.

Scans were saved as digital imaging and communications in medicine (DICOM) files.

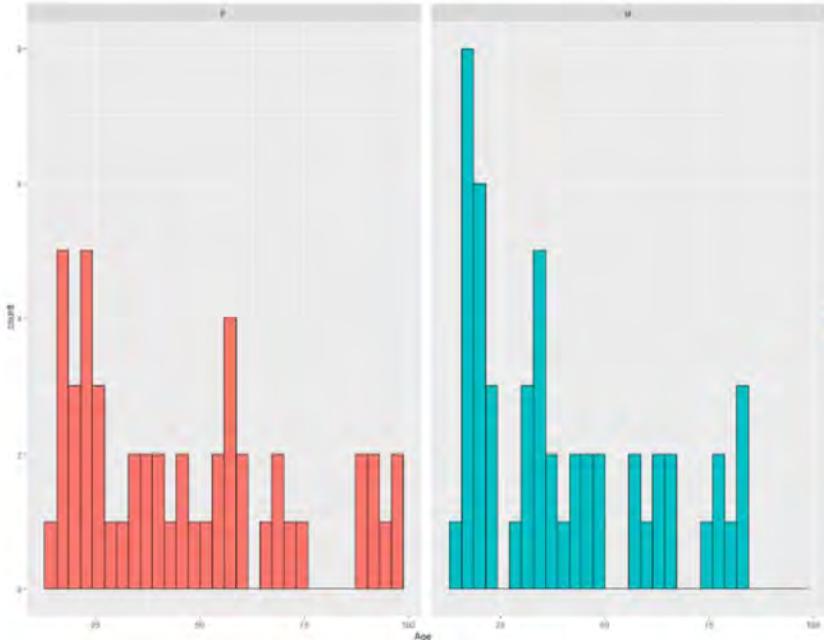


Figure 1 Histogram showing the distribution by age of the study sample for males and females by 2-year intervals.

Morphological 3D analysis and phase allocation

The right pubis was chosen arbitrarily. Reconstruction of the surface was performed using the "Isosurface" function of Amira® software (Amira 5.4.2, Mercury Computer System, Inc., Chelmsford, MA, USA). The right pubis was isolated and edited with the "Extract Surface" and "Surface Editor" functions. A phase was allocated to each pubis using morphological criteria of the SB system with the early and the advanced patterns [5]. Phase allocation was consensually performed by three observers: one experienced anthropologist (observer 1), one forensic pathologist (observer 2) and one student in forensics (observer 3). All images were analyzed without knowledge of the age of the subject and in an arbitrary order. Observers could rotate the bone in three dimensions. Six symphyseal faces of pubic bones representative of each stage are illustrated in Fig. 2.

General statistical analysis

All statistical analyses and the graphical representations were conducted with R 3.0.2 software (R Development Core Team, <http://www.R-project.org>).

To assess inter-observer reliabilities between the three observers, squared weighted Cohen's kappas were calculated, with and without the allocation of the early and advanced patterns. Following the guidelines of Landis and Koch (1977), a kappa of < 0.2 was considered poor agreement, 0.21–0.4 fair, 0.41–0.6 moderate, 0.6–0.8 substantial, and more than 0.8 near complete agreement.

Errors of estimation in the three observers

The errors of estimation in the three observers were tested by the calculation of inaccuracy and bias. The assigned age of individuals in the sample was defined as the mean age of the obtained phase. Mean errors between the estimated and real ages were calculated at 10-year age intervals. Inaccuracy was calculated as: $\sum |estimated\ age - real\ age|/n$, showing the average magnitude of the absolute error, for each observer. Moreover comparison of the inaccuracy for each pair of observers was carried out using the paired Student's *t*-test. Bias was calculated as: $\sum (estimated\ age - real\ age)/n$, expressing the tendency for either over- or underestimation of age.

Results

General statistical analysis

The distribution by allocated phases of the population showed a stage-balanced sample for each observer (Fig. 3). Regarding the entire study sample, the inter-observer reliabilities were excellent for both sexes between all the observers (with and without early and advanced patterns) (Tables 1 and 2).

By focusing on the first three phases (I–III) versus the last three phases (IV–VI) for each sex, the inter-observer reliabilities were moderate to excellent for both sexes between observers 1 and 2 and moderate to substantial for observer 3 (Tables 3 and 4).

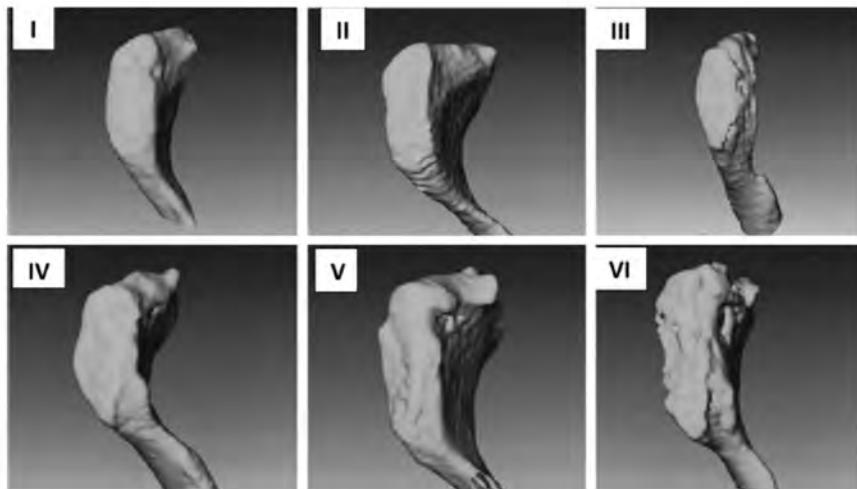


Figure 2 Symphyseal faces of pubic bones representative of each stage using the morphological features of the SB method.

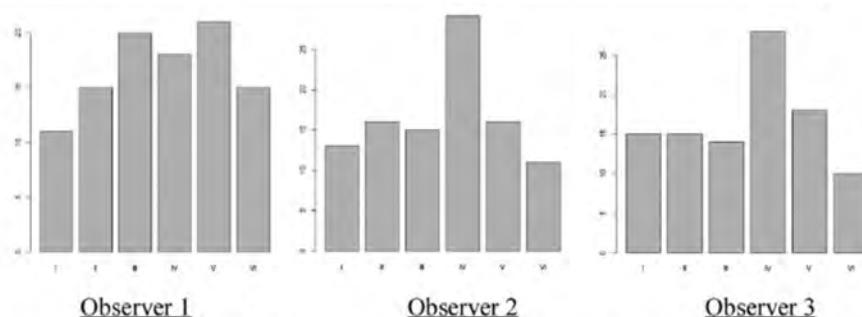


Figure 3 Charts showing the distribution by allocated stages of the study sample for each observer. Observer 1, Observer 2 and Observer 3.

Table 1 Inter-observer reliabilities for males (with and without early and advanced patterns).

Pairs of observers	Weighted Cohen's kappa (Phases without early and advanced patterns)	Weighted Cohen's kappa (Phases with early and advanced patterns)
1–2	0.91	0.94
2–3	0.8	0.86
1–3	0.83	0.87

Bold characters indicate if we consider (with) or not (without) the early and advanced patterns of the SB phases.

Table 2 Inter-observer reliabilities for females (with and without early and advanced patterns).

Pairs of observers	Weighted Cohen's kappa (For phases without early and advanced patterns)	Weighted Cohen's kappa (For phases with early and advanced patterns)
1–2	0.93	0.95
2–3	0.94	0.94
1–3	0.86	0.87

Bold characters indicate if we consider (with) or not (without) the early and advanced patterns of the SB phases.

Errors of estimation in the three observers

Tables 5 and 6 show the inaccuracy and bias in 10-year intervals for each observer when the mean ages of the SB series were applied to our sample.

Discussion

In the SB system, the changes are divided into six phases for males and females, each with an age range, mean and an early and late stage (not considered for age estimation in the method) [5,7]. Some previous studies have highlighted how most estimation errors occur for the advanced stages (IV, V and VI), whereas reproducibility seems to be considerable in the initial stages (I, II and III) [4,12–14]. Most of them reported inter-observer tests based on only two observers.

Regarding our study, we focused on the inter-observer agreement in the SB method among three observers with heterogeneous experience from a French computed tomography sample. With and without early and advanced patterns, we highlighted a very moderate "learning effect" with excel-

lent inter-observer reliabilities for both sexes between the most experienced observers (kappa values between 0.91 and 0.95) and very strong inter-observer agreements by considering the least experienced observer (kappa values between 0.8 and 0.94). The topic of the inter-observer reliability is largely described in the literature. Lottering et al. reported a kappa value of 0.87, whereas Villa et al. reported a kappa value of 0.3 [12,13]. Unlike our study using a stage- and sex-balanced sample, most of the previous studies used a sample with an overrepresentation of older individuals [12] and males [15].

As the comparison was between the inter-observer reliabilities of the first three phases versus the last three phases, we could have expected that reproducibility was better for young individuals (phases I to III) as compared to older individuals (phases IV to VI). Indeed, it seems to be more difficult to assign a phase for older individuals – with continuous morphological changes specific to degeneration, requiring a major experience – than for younger individuals where the phase allocation is linked to discrete morphological criteria specific to maturation. However, our results revealed there was no significant difference between the inter-observer reliabilities for these two

Table 3 Inter-observer reliabilities for males (with and without early and advanced patterns).

Pairs of observers	Weighted Cohen's kappa (Phases without early and advanced patterns)		Weighted Cohen's kappa (Phases with early and advanced patterns)	
	Phases I—III	Phases IV—VI	Phases I—III	Phases IV—VI
1–2	0.72	0.77	0.84	0.83
1–3	0.61	0.44	0.74	0.49
1–3	0.45	0.59	0.62	0.59

Bold characters indicate if we consider (with) or not (without) the early and advanced patterns of the SB phases.

Table 4 Inter-observer reliabilities for females (with and without early and advanced patterns).

Pairs of observers	Weighted Cohen's kappa (Phases without early and advanced patterns)		Weighted Cohen's kappa (Phases with early and advanced patterns)	
	Phases I—III	Phases IV—VI	Phases I—III	Phases IV—VI
1–2	0.83	0.71	0.83	0.85
2–3	0.83	0.82	0.83	0.82
1–3	0.56	0.56	0.59	0.63

Bold characters indicate if we consider (with) or not (without) the early and advanced patterns of the SB phases.

Table 5 Inaccuracy and bias of estimated ages relative to the mean ages of the SB series for males.

Age range	Observer 1		Observer 2		Observer 3	
	Inaccuracy (Years)	Bias (Years)	Inaccuracy (Years)	Bias (Years)	Inaccuracy (Years)	Bias (Years)
10–19	4.46	4.8	3.21	3.13	6.65	6.56
20–29	3.77	2.62	4.02	4.02	3.77	0.88
30–39	4.52	2.6	2.76	−0.47	6.3	5.55
40–49	10.2	−10.2	9.55	−9.55	6.95	−6.95
50–59	15.6	−14.72	14.3	−13.42	18.9	−18.9
60–69	19.95	−19.95	25.47	−25.47	21.25	−21.25
70–79	30.73	−30.73	30.73	−30.73	34.2	−34.2
80–89	29.35	−29.35	29.35	−29.35	29.35	−29.35
Entire range	10.86	−5.98	10.36	−7.12	12.05	−5.62

Table 6 Inaccuracy and bias of estimated ages relative to the mean ages of the SB series for females.

Age range	Observer 1		Observer 2		Observer 3	
	Inaccuracy (years)	Bias (years)	Inaccuracy (years)	Bias (years)	Inaccuracy (years)	Bias (years)
10–19	11	11	5.28	5.28	3.18	3.18
20–29	3.63	2.38	3.63	2.38	3.4	1.13
30–39	5.1	5	1.8	1.7	3.93	−0.5
40–49	4.58	−1.51	5.86	−3.16	6.95	−4.25
50–59	11.66	−10.11	11.82	−10.48	12.45	−11.12
60–69	19.77	−19.77	20.87	−20.87	23.35	−23.35
70–79	24.4	−24.4	29.35	−29.35	34.3	−34.3
80–89	28	−28	28	−28	28	−28
90–99	33.66	−33.66	35.65	−35.65	35.65	−35.65
Entire range	12.83	−6.37	12.23	−8.47	12.74	−9.93

groups (kappa values between 0.44 and 0.85). Besides, the inter-observer agreements were overall similar, ranging from moderate to excellent between observers 1 and 2 and moderate to substantial for observer 3.

Moreover, we noticed that the inaccuracy rose with age, especially from 60 years old and beyond, with a growing underestimation for both sexes. We reported a 20-years underestimation over 60 years old and a 30-years underestimation over 80 years old for both sexes by the three observers. Besides, we highlighted a moderate overestimation for younger individuals. These errors of estimation were slightly dependent on the experience of the observer. Despite some different methodological analyses and various populations, these results generally correspond with the values in the literature [9,12,16]. This high degree of inaccuracy is absolutely not acceptable, especially regarding death investigations in the forensic context. The results should be interpreted with great caution and many reservations when the SB series are considered to estimate the age at death of an individual. The underestimation of the older individuals is a prominent issue still debated in the literature. Hoppa noticed that this underestimation was not simply a product of having only six stage means [8]. Within this framework, it is interesting to note that more and more authors have suggested to add a later stage, stage VII, to specify age estimation for the last decades [17–19].

Furthermore, the use of a reference sample built from a forensic population, such as in the SB sample, in which young males are overrepresented likely increases this lack of precision, particularly by the effect of "attraction to the mean" [20]. In the field of paleodemography, Bocquet-Appel and Masset were the first researchers to highlight this effect and showed that the age structure of the reference sample was reflected in the estimated age distribution of the target sample [21,22].

As our sample regards, individuals underwent a scan in the clinical context of general condition alteration or suspicion of abdominal diseases, which was a selection bias. Yet, they were not necessarily affected by a chronic disease or any organic pathology. Thus, this population was quite naturally diversified and may in that sense be representative of the general population.

Finally, this original study including three observers enables to conclude according to a threefold perspective: firstly, on the opposite of our expectations, we did not highlight some differences between the first three phases and the last three ones regarding the inter-observer agreement; and secondly, the errors of estimation were slightly dependent on the experience of the observer.

Disclosure of interest

The authors declare that they have no competing interest.

References

- [1] Cunha E, Baccino E, Martrille L, et al. The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic Sci Int* 2009;193:1–13.
- [2] Fanton L, Gustin MP, Paultre U, et al. Critical study of observation of the sternal end of the right 4th rib. *J Forensic Sci* 2010;55:467–72.
- [3] Konigsberg LW, Hermann NP, Wescott DJ, et al. Estimation and evidence in forensic anthropology: age-at-death. *J Forensic Sci* 2008;53:541–57.
- [4] Savall F, Rérolle C, Hérin F, et al. Reliability of the Suchey-Brooks method for a French contemporary population. *Forensic Sci Int* 2016;266 [586.e1–586.e5].
- [5] Brooks S, Suchey JM. Skeletal age determination based on the os pubis: a comparison of the Acsadi-Nemeskeri and Suchey-Brooks methods. *Hum Evol* 1990;5:227–38.
- [6] Todd TW. Age changes in the pubic bones I: the white male pubis. *Am J Phys Anthropol* 1920;3:285–334.
- [7] McKern TW, Stewart TD. Skeletal age changes in young American males. Natick, MA: Quartermaster Research and Development Command Technical Report; 1957.
- [8] Hoppa RD. Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis. *Am J Phys Anthropol* 2000;111:185–91.
- [9] Schmitt A. Age-at-death assessment using the os pubis and the auricular surface of the ilium: a test on an identified Asian sample. *Int J Osteoarchaeol* 2004;14:1–6.
- [10] Baccino E, Tavernier JC, Lamendin H, et al. Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes. *J Med Leg Droit Med* 1991;34:27–33.
- [11] Lovejoy CO, Meindl RS, Tague RG, et al. The senescent biology of the hominid pelvis. *Riv Antropol* 1995;73:31–49.
- [12] Lottering N, MacGregor DM, Meredith M, et al. Evaluation of the Suchey-Brooks method of age estimation in an Australian subpopulation using computed tomography of the pubic symphyseal surface. *Am J Phys Anthropol* 2013;150:386–99.
- [13] Villa C, Buckberry J, Cattaneo C, et al. Technical note: reliability of Suchey-Brooks and Buckberry-Chamberlain methods on 3D visualizations from CT and laser scans: age estimation methods and 3D visualizations. *Am J Phys Anthropol* 2013;151:158–63.
- [14] Telmon N, Gaston A, Chemla P, et al. Application of the Suchey-Brooks method to three-dimensional imaging of the pubic symphysis. *J Forensic Sci* 2005;50:507–12.
- [15] Acsadi G, Nemeskeri J. History of human life span and mortality. Budapest: Akadémiai Kiadó; 1970.
- [16] San Millán M, Rissech C, Turbon D. A test of Suchey-Brooks (pubic symphysis) and Buckberry-Chamberlain (auricular surface) methods on an identified Spanish sample: paleodemographic implications. *J Archaeol Sci* 2013;40:1743–51.
- [17] Berg GE. Pubic bone age estimation in adult women. *J Forensic Sci* 2008;53:569–77.
- [18] Hartnett KM. Analysis of age-at-death estimating using data from a new, modern autopsy sample – part I: pubic bone. *J Forensic Sci* 2010;55:1145–51.
- [19] Dubourg O, Faruqui-Bilfeld M, Telmon N, et al. Correlation between pubic bone mineral density and age from a computed tomography sample. *Forensic Sci Int* 2019;298:345–50.
- [20] Bocquet-Appel JP, Masset C. Paleodemography: expectancy and false hope. *Am J Phys Anthropol* 1996;99:571–83.
- [21] Bocquet-Appel JP, Masset C. Farewell to paleodemography. *J Hum Evol* 1982;11:321–33.
- [22] Usher B. Reference samples: the first step in linking biology and age in the human skeleton. In: Hoppa RD, Vaupel JW, editors. *Paleodemography: age distributions from skeletal samples*. New York: Cambridge University Press; 2002. p. 29–47.

X- Résumés et mots-clés

X-1. Résumé et mots-clés de la thèse en français

L'estimation de l'âge au décès est une étape majeure afin d'établir un profil biologique et permettre une identification reconstructive en anthropologie médico-légale. Ainsi, de nombreuses régions anatomiques ont été étudiées, notamment la symphyse pubienne qui présente un intérêt majeur par sa maturation tardive. Une des méthodes d'évaluation les plus connues est celle de Brooks et Suchey basée sur les caractéristiques morphologiques de la symphyse pubienne. De manière générale, l'os est en remodelage constant, ce qui se traduit notamment par une diminution plus ou moins linéaire de sa densité avec l'âge. Les progrès en imagerie médicale permettent de mesurer de façon simple, sur des images scanographiques, la densité minérale osseuse (DMO).

L'objectif premier de notre travail était d'évaluer en quoi la DMO serait susceptible d'améliorer l'estimation de l'âge, notamment lors de l'utilisation de la méthode de Brooks et Suchey. En réalisant une étude rétrospective à partir d'examens tomodensitométriques de 88 symphyses publiennes d'individus masculins et 113 d'individus féminins âgés de plus de 40 ans, nous avons mis en évidence une corrélation négative significative entre la densité osseuse et l'âge pour les deux sexes, associée à d'excellents accords intra- et inter-observateurs concernant l'allocation de la phase de Suchey-Brooks. A travers une étude rétrospective basée sur un échantillon de référence de 1099 examens tomodensitométriques et un échantillon test de 339 examens tomodensitométriques, nous avons constaté une bonne fiabilité sur l'estimation de l'âge en combinant la mesure de la DMO avec la méthode de Brooks et Suchey, en particulier pour les sujets âgés de plus de 65 ans. Enfin, au moyen de deux échantillons d'examens tomodensitométriques post-mortem, l'application de la méthode de la densité osseuse a révélé des résultats prometteurs sur l'estimation de l'âge en période post-mortem précoce, au contraire des résultats obtenus sur des os secs où la variabilité était très importante.

L'objectif second de notre travail était basé sur l'étude des apports méthodologiques de la DMO en explorant la perspective d'utiliser les unités Hounsfield plutôt que la densité osseuse moyenne dans l'estimation de l'âge. Nous avons construit rétrospectivement un échantillon référence de 400 symphyses publiennes et un échantillon test de 120 symphyses publiennes. Nous avons mis en évidence des erreurs absolues moyennes homogènes entre les mesures en unités Hounsfield et les densités osseuses moyennes, la plupart inférieures à 10 ans. En outre, nous avons observé une surestimation modérée chez les individus jeunes et une surestimation minime chez les individus plus âgés.

Les contributions de notre travail sont les suivantes : au moyen d'une approche méthodologique originale liée à des mesures réalisées sur des scanners de sujets vivants, la DMO, par ses propriétés de reproductibilité et de continuité, pourrait aider à améliorer la précision de l'estimation de l'âge par la méthode de Suchey-Brooks, particulièrement pour les individus âgés. De plus, avec une fiabilité importante, les mesures en unités Hounsfield semblent appropriées pour corrélérer la densité osseuse avec l'âge d'un individu dans des contextes médicaux et médico-légaux. Enfin, les premiers résultats paraissent orienter vers une validation de cette méthode en période post-mortem précoce notamment chez des sujets de sexe masculin.

Mots-clés : densité minérale osseuse, scanner, estimation de l'âge, anthropologie biologique, symphyse pubienne.

X-2. Résumé et mots-clés de la thèse en anglais

In forensic anthropology, the estimation of age at death is mainly required to establish a biological profile and facilitate individual identification. Thus, many anatomical structures have been studied, such as the pubic symphysis, which is a source of major interest due to its late maturation. One of the most well-known methods of assessment is the Suchey-Brooks (SB) system based on the morphological characteristics of the pubic symphysis. Generally, bony structures are constantly remodeling. This is mainly seen as a more or less linear reduction in density with increasing age. The progress made in medical imaging enable to easily measure bone mineral density (BMD) on computed tomography (CT) images.

The aim of our first work was to assess the benefit of BMD in age estimation, especially by using the SB method. By studying pubic bones from 88 males and 113 females over 40 years of age, we revealed a significant negative correlation between BMD and age for males and females with moderate to strong intra- and inter-observer reliabilities of the phase allocation in the SB system. We retrospectively used a reference sample of 1099 CT scans and a test sample of 339 CT scans of pubic symphyses. We revealed an interesting reliability in age estimation by combining BMD measurements and SB method, especially for individuals over 65 years of age. At last, we used two samples of post-mortem CT scans and showed some promising results about age estimation at early post-mortem period, but not regarding dry bones.

The aim of our second work was to analyse methodological benefits of BMD by exploring the feasibility of using HU instead of mBD values for age estimation. We retrospectively built a reference sample of 400 pubic symphyses using computed tomography at a French hospital and a test sample of 120 pubic symphyses. We highlighted homogeneous mean absolute errors for both HU and mBD values, most of them being less than 10 years. Moreover, we reported a moderate overestimation for younger individuals and a very small underestimation for older individuals.

Contributions of our work are as follows : thanks to an original methodological approach based on clinical CT scan measurements, BMD might help to improve the reliability of the SB system by its advantages of being reproducible and continuous, especially for older individuals. Moreover, with a valuable level of reliability, HU measurements seem to be suitable for linking bone density with the age of individuals in forensic practice. Finally, the first results seem to confirm this method from early post-mortem CT images of males corpses.

Keywords : bone mineral density, CT scan, age estimation, physical anthropology, pubic symphysis.