

## ESTIMATION DE L'ÂGE AU DÉCÈS DES SUJETS ADULTES À PARTIR DU SQUELETTE : DES RAISONS D'ESPÉRER

### AGE-AT-DEATH ASSESSMENT OF ADULT SKELETONS: REASONS FOR HOPE

A. SCHMITT <sup>1</sup>

#### RÉSUMÉ

L'estimation de l'âge au décès des individus adultes à partir du squelette est une limite majeure de l'anthropologie. Nous exposons dans cet article les raisons du manque de fiabilité des méthodes actuelles : (1) la variabilité de la sénescence et la valeur des indicateurs osseux et dentaires ; (2) les écueils méthodologiques. Suite à ces analyses, nous proposons la démarche méthodologique à suivre pour élaborer des méthodes qui permettent de mener des études paléobiologiques fiables.

*Mots-clés* : sénescence, variabilité, indicateur osseux, estimation, méthodes, fiabilité.

#### ABSTRACT

*The estimation of the age at death of adult individuals based on skeletal material is one of the most difficult problems in anthropology. We present in this paper the reasons why current methods are not reliable: (1) variation in the process of biological aging and the value of skeletal and dental indicators; (2) methodological biases. With these analyses, methodological steps are proposed for the development of reliable methods for palaeobiological studies.*

*Key words*: senescence, variability, bone indicator, assessment, methods, reliability.

#### INTRODUCTION

Face à un vestige humain, deux questions fondamentales se posent : quel était le sexe de l'individu et à quel âge est-il décédé ? Cette identification est primordiale, car la plupart des paramètres étudiés ensuite sont dépendants de ces deux critères. Si la

---

1. UMR 8555 du CNRS, Centre d'Anthropologie, 39 allées Jules Guesde, 31000 Toulouse.

UMR 5809 du CNRS, Laboratoire d'Anthropologie des Populations du Passé, Université Bordeaux 1, avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex, e-mail : schmitt.aurore@wanadoo.fr

Manuscrit reçu le 10 avril 2002, accepté le 28 juin 2002.

détermination du sexe dispose, en général, d'une méthodologie très fiable, à présent, il en est tout autrement de l'estimation de l'âge au décès, particulièrement après l'âge de 20 ans.

C'est seulement depuis le début des années 1990 qu'un certain consensus se dégage sur la fiabilité des méthodes d'estimation de l'âge au décès des adultes. Les tests de validité des méthodes se sont développés, et les résultats ont bel et bien démontré que les marqueurs de la sénescence du squelette humain sont variables, dans le temps et dans l'espace. Les ouvrages anthropologiques récents ne se contentent plus d'énumérer les méthodes d'estimation de l'âge au décès des adultes, mais ils en font aussi la critique (Rösing, Kvaal, 1998 ; Cox, 2000 ; Jackes, 2000). L'imprécision de l'estimation de l'âge au décès est donc un fait maintenant admis. Cette remise en cause a conduit les anthropologues à développer différentes stratégies. La première consiste à abandonner l'âge individuel précis pour des classements par intervalle chronologique (par exemple : Alesan *et al.*, 1999 ; Slaus, 2000 ; Bocquentin *et al.*, 2001). Néanmoins, la taille des intervalles, aussi large soit-elle, ne garantit pas la fiabilité de l'estimation. L'alternative est la distinction de deux classes (20-30 ans et plus de 30 ans- Murail, 1996 ; Schulting, 2001). L'estimation de l'âge au décès des individus adultes représente ainsi, à l'heure actuelle, la pierre d'achoppement de toute recherche en paléanthropologie (Masset, 1990, 1993 ; Mays, 1998 ; Cox, 2000). Cette limite étant désormais admise, le domaine de la paléodémographie a vu fleurir des méthodes statistiques très sophistiquées pour calculer la distribution par âge d'une population dont l'âge au décès est inconnu, sans passer par l'âge individuel au décès (par exemple, Konisberg, Frankenberg, 1992 ; Bocquet-Appel, Bacro, 1997 ; Müller *et al.*, 2001 ; Konisberg, Frankenberg, 2002 ; Love, Müller, 2002). Cependant, même si ce n'est pas l'âge estimé de chaque individu qui est pris en compte, la distribution de chaque stade d'évolution d'un indicateur par classe d'âge, regroupée en tableau de contingence, provient des observations faites sur le squelette de chaque spécimen (Bocquet-Appel, Masset, 1996 ; Jackes, 2000). Les procédures statistiques ne peuvent pas surmonter les limites d'un échantillon biaisé au départ et d'un mauvais indicateur d'âge (Meindl, Russel, 1997).

L'objectif de cet article est d'identifier les sources d'erreur méthodologique. En effet, pour extraire l'information primordiale qui concerne l'âge, il est nécessaire de comprendre, d'une part, les paramètres biologiques qui induisent les changements du squelette avec l'âge et, d'autre part, d'éliminer les biais systématiques rencontrés dans les méthodes (Chamberlain, 2000). Cette première étape permettra de proposer une démarche méthodologique adaptée à cette vaste problématique et de cerner les progrès réalisables.

## PRINCIPES BIOLOGIQUES

### **La sénescence : un phénomène biologique variable**

L'âge biologique est extrêmement variable entre individus adultes d'une même population et entre populations (Iscan, 1998 ; Ubelaker, 2000). C'est la raison pour laquelle l'estimation de l'âge chronologique est si imprécise. Chez le vivant, l'apparence physique et l'état de santé d'un individu ne correspondent pas toujours à son âge chronologique. L'âge biologique d'un individu se réfère à la situation d'un organisme, en fonction de la longévité potentielle qui lui reste. Certains individus subissent une sénescence plutôt lente, d'autres plus rapide. La sénescence est un déclin progressif, irréversible, universel et cumulatif de l'organisme (Arking, 1998) qui mène inexorablement au décès (Comfort, 1979 ; Harper, Crews, 2000), même si la capacité de survivance de l'individu est élevée. L'organisme subit une détérioration physiologique interne (Rose, 1991) qui engendre une perte de réponse adaptative au stress et augmente le risque de contracter des maladies liées à l'âge (Kirkwood, 1995). Il est, malheureusement impossible de fixer l'âge précis auquel la sénescence commence (Susanne, 1986). L'hypothèse selon laquelle un gène spécifique provoquerait la sénescence est désormais obsolète (Schächter, 1998 ; Vaupel *et al.*, 1998). Les études sur le phénomène de vieillissement accéléré (Dyer, Sinclair, 1998) montre qu'un seul gène ne peut provoquer le phénomène complexe de la sénescence. C'est l'accumulation des mutations qui induisent des effets délétères (Medawar, 1952 ; Rose, 1991) créant une accumulation de défauts et de lésions somatiques (Hayflick, 1998 ; Kirkwood, Ritter, 1998). En effet, si les fonctions courantes de réparation et de maintien des cellules sont moins bien contrôlées, cela induit une défaillance graduelle des fonctions physiologiques.

Du fait de l'interaction entre leur patrimoine génétique et le milieu environnant, la sénescence et son ampleur varient d'un individu à l'autre. Le statut socio-économique, par exemple, influence la mortalité par la différence en nutrition, la différence dans le développement des individus et l'exposition aux agents infectieux (Milner *et al.*, 2000 ; Bielicki *et al.*, 2001). Les plus fragiles meurent en premier, laissant une population résiduelle, qui, avec le temps représente une sous-population, constituée des individus les plus résistants (Kirkwood, Austad, 2000).

De plus, les individus dont le potentiel somatique a permis une plus grande longévité ne présentent pas nécessairement un squelette « âgé ». Un individu décédé jeune peut avoir un squelette usé, et un individu mort à un âge avancé, un squelette qui paraît jeune (Angel, 1984 ; Molleson, 1995), ce qui constitue un paradoxe ostéologique, décrit par Wood *et al.* (1992).

### **Marqueurs de l'âge au décès**

Les méthodes d'estimation de l'âge au décès des individus adultes se basent surtout sur des indicateurs de la sénescence, exception faite de la synostose des sutures crâniennes et de la modification de la symphyse pubienne qui s'apparentent, en partie, à des processus de maturation osseuse.

#### ***Synostose des sutures crâniennes***

C'est un phénomène à élucider (Cohen, 1993). La synostose des sutures crâniennes pourrait être le résultat d'un dysfonctionnement du métabolisme cellulaire, ce qui expliquerait que les individus sont touchés de façon très variable (Pensler *et al.*, 1995). Mais, l'hypothèse fonctionnelle n'est pas négligeable. L'ouverture des sutures permet le développement du cerveau. Une fois celui-ci achevé, les sutures de la voûte crânienne n'ont pas d'utilité particulière. Cependant, le fait que les individus âgés possèdent souvent les sutures ouvertes montrent qu'elles sont favorables à une survie prolongée (Key *et al.*, 1994). L'utilisation d'un phénomène biologique mal connu comme indicateur d'âge au décès est hasardeuse. Masset (1982) soulignait, à juste titre, que la relation entre l'âge et la fermeture des sutures est purement statistique. Il y a une différence nette entre ce phénomène et les autres indicateurs de l'âge. Pour ces derniers, l'évolution avec l'âge est variable, mais ces indicateurs ne demeurent jamais dans leur état initial, ils évoluent inéluctablement avec l'âge, alors que les sutures crâniennes peuvent rester ouvertes.

#### ***Remodelage osseux***

Il est exploité de deux façons : l'observation de la diminution de l'os spongieux de l'épiphyse des os longs (Acsadi, Nemeskeri, 1970 ; Bergot, Bocquet, 1976) et l'observation des structures corticales microscopiques (Kerley, 1965). Bien que ces indicateurs soient différents, ils exploitent le déséquilibre entre le taux de formation et de résorption osseuse qui induit une diminution du capital osseux avec l'âge. Or, cette perte osseuse, bien qu'universelle et conduisant le plus souvent à l'ostéoporose chez l'être humain, n'en est pas moins variable entre individus, sexes, et populations (Robling, Stout, 2000). Elle dépend en grande partie de la masse osseuse maximale initiale acquise durant la croissance. Or, l'accumulation osseuse pendant l'adolescence est, elle-même, contrôlée par l'interaction complexe de facteurs génétiques (Bachrach *et al.*, 1999 ; Rizzoli, Bonjour, 1999), hormonaux (Frost, 1988) et environnementaux (Davis *et al.*, 1999 ; Lane *et al.*, 2000). La masse osseuse de départ d'un individu à l'autre est donc très variable. La perte osseuse est également variable entre populations. À titre d'exemple, les adultes noirs-américains possèdent une densité musculaire et osseuse plus élevée que celle des blancs américains (Parfitt *et al.*, 1997) et une vitesse

de remodelage moins rapide (Han *et al.*, 1997). Il existe également des différences sexuelles. La gestation et la lactation perturbent et augmentent le remodelage osseux chez la femme (Lazenby, Pfeiffer, 1994) induisant une raréfaction osseuse plus importante chez la femme que chez l'homme (Feik *et al.*, 1997) particulièrement à la ménopause (Nutti, Martini, 1993). De plus, l'âge de la ménopause est, lui aussi, variable selon les femmes et les populations (Pavelka, Fedigan, 1991).

### ***Pathologie dégénérative***

La pathologie dégénérative sur les articulations est également exploitée pour estimer l'âge au décès. Elle regroupe deux types de lésions : celles qui se produisent sur la surface articulaire, communément appelée ostéoarthrose, celles qui se situent dans les zones d'insertion des ligaments et des tendons, *l'enthésopathie* (Crubézy, 1998). Les atteintes sur l'os ont longtemps été considérées comme le résultat d'un processus progressif. Mais, tous les individus ne sont pas atteints d'arthrose ou d'enthésopathie avec l'âge. La sénescence n'est pas à l'origine des pathologies dégénératives, ce n'est qu'un facteur de risque supplémentaire (Arlet, Mazières, 1985 ; Kirkwood, 1997), au même titre que les facteurs de risque mécaniques, constitutionnels et génétiques (Dutour, 1986 ; Peyron, 1987 ; Resnick, Niwayana, 1988 ; Fournié, 1993 ; Menkes, 1995).

Les articulations peu mobiles souffrent moins de troubles mécaniques que les articulations mobiles, qui sont sujettes à plus de mouvements et donc à l'usure. On préfère ainsi, pour estimer l'âge au décès, observer les articulations cartilagineuses (telles que la symphyse pubienne ou la surface auriculaire de l'*ilium*) et les articulations fibreuses (telles que l'extrémité sternale des côtes) plutôt que les articulations synoviales.

L'intérêt de la *symphyse pubienne* pour estimer l'âge au décès réside dans sa maturation tardive qui est moins variable que les processus dégénératifs qui lui succèdent. À partir de 40 ans, les changements de la symphyse pubienne sont aléatoires, surtout chez la femme (Meindl *et al.*, 1985 ; Suchey *et al.*, 1986 ; Baccino *et al.*, 1991).

La *surface sacro-pelviennne iliaque*<sup>2</sup> est un indicateur intéressant pour l'estimation de l'âge au décès des adultes. En effet, l'articulation sacro-iliaque est très particulière. D'une part, elle est, par essence, dégénérescente du fait de sa fonction biomécanique. Elle est verrouillée et subit de fortes contraintes très tôt dans la vie. Dans les populations actuelles, la sénescence de l'articulation commence à 30 ou 40 ans (Sashin, 1930 ; Bowen *et al.*, 1981 ; Stewart, 1984). Ces phénomènes sont des caractères constants à partir de 50 ans (Resnick *et al.*, 1975). D'autre part, la nature du cartilage iliaque est particulière, il ne s'agit pas de cartilage hyalin typique (Paquin *et al.*, 1983 ; Brunner *et al.*, 1991) ; sa minceur est sa principale caractéristique, ce qui explique la précocité des atteintes dégénératives de la surface sacro-pelviennne iliaque d'où son intérêt pour estimer l'âge au décès.

---

2. Il s'agit ici du complexe de la surface auriculaire de l'*ilium* et de la tubérosité iliaque, c'est la raison pour laquelle nous la nommons surface sacro-pelviennne iliaque.

*L'extrémité sternale des côtes* forme une cavité dans laquelle pénètre l'extrémité du cartilage costal. À la jonction de la structure osseuse et du cartilage, le périoste costal est conjoint avec le périchondre du cartilage, ce qui contribue à la solidité de l'articulation. Avec l'âge, un puits se forme à l'extrémité sternale des côtes. Cette transformation de l'extrémité sternale des côtes est directement liée au remodelage osseux (Epker *et al.*, 1965 ; Iscan *et al.*, 1984a, b).

### **Indicateurs dentaires**

Les indicateurs dentaires de la sénescence sont *l'usure de l'émail* et le *remodelage histologique du tissu dentaire*. L'usure dentaire a fait l'objet de nombreuses méthodes d'estimation de l'âge au décès (Murphy, 1959 ; Molnar, 1971 ; Scott, 1979 ; Van Reenen, 1982 ; Walker *et al.*, 1991 *inter alia*). Mais, elle dépend de paramètres culturels pour servir d'indicateur de l'âge sur des populations anciennes. Elle est spécifique à chaque population selon ses habitudes alimentaires. C'est l'indicateur le moins approprié pour estimer l'âge au décès dans l'état actuel de son application.

Le remodelage histologique des dents se manifeste par la formation de la dentine secondaire, l'augmentation de la transparence de la racine, la résorption de la racine et l'apposition cémentaire.

La cavité pulpaire diminue avec l'âge (Torneck, 1990) par la croissance continue de la dentine secondaire. Mais, celle-ci est étroitement liée aux phénomènes pathologiques, notamment, la parodontose (Lamendin *et al.*, 1990). La transparence de la racine est due à la minéralisation des tubules dentinaires, qui deviennent d'une finesse imperceptible (Beust, 1931 ; Bang, Monsen, 1968). Le fait que ce phénomène soit ou non affecté par des pathologies dentaires (Drusini *et al.*, 1990 ; Prince, Ubelaker, 2002) est discutable. Quant à la résorption de la racine, elle a une faible incidence avec l'âge (Johanson, 1971 ; Solheim, Kvaal, 1993).

D'abord utilisée pour déterminer l'âge de certains mammifères (Lieberman, 1993), l'apposition du ciment dentaire s'est avérée excellente pour estimer l'âge et la saison d'abattage, sur des séries actuelles et fossiles (Martin, 1994, 1996). En effet, les anneaux cémentaires se forment selon un rythme annuel. Cependant, l'influence des phénomènes pathologiques sur la cémentogénèse chez l'homme a été démontrée (Condon *et al.*, 1986 ; Kagerer, Grupe, 2001 ; Wittwer-Backhofen, Buba, 2002).

La sénescence du tissu dentaire est donc aussi variable que le tissu osseux et subit l'influence de paramètres qui ne sont pas liés à l'âge (Mandojana *et al.*, 2001).

### **Synthèse**

Les changements relatifs à la sénescence du squelette humain sont donc induits par une multitude de facteurs et l'évolution des indicateurs osseux ou dentaires qui donnent des informations sur l'âge biologique sont loin de permettre l'estimation de l'âge

chronologique. Le déclin de l'organisme avec l'âge n'est pas un phénomène simple, invariant et linéaire, il dépend de facteurs extrêmement nombreux et de l'interaction entre les gènes et le milieu environnant. C'est la raison pour laquelle la corrélation entre les changements du squelette et l'âge chronologique est faible (Masset, 1993 ; Jackes, 2000).

Les recherches pour estimer l'âge au décès des adultes à partir du squelette doivent donc tenir compte de la variabilité de la manifestation de la sénescence entre individus quels que soient l'indicateur et la méthode proposés. Ignorer la variabilité au sein d'une même population et entre populations, c'est ignorer la limite majeure des méthodes d'estimation de l'âge au décès des adultes appliquées aux séries archéologiques. L'intérêt d'un indicateur et d'une méthode doit être étudié sur un nombre suffisant de collections d'âge connu pour analyser au moins la variabilité dans l'espace (Schmitt *et al.*, 2002).

Il est beaucoup plus prudent de chercher à donner des indications sur l'âge par intervalle chronologique, plutôt que de rechercher une précision que l'on sait improbable. De plus, le développement des recherches sur la sénescence du squelette, notamment sur les maladies liées à l'âge, permettra peut-être de déterminer et de maîtriser des facteurs qui amélioreront l'estimation de l'âge au décès.

## LES ÉCUEILS MÉTHODOLOGIQUES

Ces écueils peuvent être divisés en plusieurs groupes, l'observation des indicateurs et les paramètres qui influencent le traitement des données.

### **Fidélité et reproductibilité des caractères : une condition primordiale**

La fidélité<sup>3</sup> et la reproductibilité<sup>4</sup> des observations proposées dans les méthodes sont indispensables. Quel que soit l'objectif d'une observation sur le squelette, elle doit faire l'objet d'une standardisation préalable à l'interprétation pour éviter les différences entre observateurs. Si une méthode requiert une expérience, son intérêt en est d'autant plus limité (Lynnerup *et al.*, 1998), l'expérience devenant un facteur de biais. Or, une méthode d'estimation de l'âge doit être reproductible par n'importe quel observateur, expérimenté ou non. Ces problèmes de lecture touchent toutes les méthodes d'estimation de l'âge au décès des adultes, toutes techniques confondues.

---

3. Analyse de la marge d'erreur lorsqu'une même personne effectue deux séries successives d'observations.

4. Analyse de la concordance des observations entre différents observateurs.

Outre le problème de lecture des caractères métriques ou qualitatifs, les tests statistiques utilisés pour analyser la variabilité, la fidélité, et la reproductibilité sont discutables. C'est souvent le résultat de l'estimation de l'âge, lui-même, qui est utilisé comme indicateur des erreurs inter et intra-observateurs. Les études utilisent soit la comparaison de l'âge moyen estimé sur un échantillon (Baccino *et al.*, 1999), soit la corrélation entre les âges estimés de deux observateurs (Lovejoy *et al.*, 1985b), ou encore, la comparaison de l'estimation de la distribution par âge d'un échantillon par le test Kolmogorov-Smirnov (Kunos *et al.*, 1999). Mais l'âge estimé est une interprétation de la lecture ou des mesures des indicateurs, ce n'est donc pas le meilleur moyen d'évaluer la reproductibilité des méthodes. La comparaison directe des observations, des phases, des scores, etc., est plus appropriée et plus directe. La mesure de la concordance entre deux observations est beaucoup plus intéressante (Saunders *et al.*, 1992) ; elle reflète le résultat individu par individu alors que les autres types d'analyses ont tendance à donner des résultats généraux sur les observations des deux investigateurs en noyant l'information élémentaire.

#### **Interdiction d'utiliser des échantillons de référence d'âge au décès inconnu**

L'utilisation de collections ostéologiques d'âge individuel inconnu est à proscrire absolument pour mettre au point de nouvelles méthodes d'estimation de l'âge au décès. Prenons, à titre d'exemple, la proposition d'une nouvelle méthode pour estimer l'âge à partir de l'attrition dentaire sur une population protohistorique (Dreier, 1994). L'âge au décès est estimé en premier avec la symphyse pubienne et les sutures crâniennes. Les estimations ainsi obtenues sont considérées comme reflétant l'âge réel au décès. Le standard proposé ensuite pour estimer l'âge à partir de l'attrition dentaire se base donc sur des estimations, ce qui est beaucoup trop optimiste.

#### **Nécessité de valider la fiabilité des méthodes sur des échantillons indépendants**

Pour valider une méthode, c'est-à-dire pour démontrer qu'elle permet d'estimer un âge au décès fiable, il faut qu'elle soit testée en aveugle sur des individus qui n'ont pas été inclus dans l'échantillon de référence. Le plus souvent, l'échantillon de validation provient de la même collection (Lovejoy *et al.*, 1985a, b ; Kunos *et al.*, 1999 ; Cho *et al.*, 2002). La méthode Suchey-Brooks basée sur la symphyse pubienne a été testée de nombreuses fois sur des collections différentes de celle qui a servi de référence (Iskan *et al.*, 1992 ; Saunders *et al.*, 1992 ; Santos, 1996 ; Baccino *et al.*, 1999 ; Hoppa, 2000). Il en est de même pour la méthode basée sur la quatrième côte (Iskan *et al.*, 1987 ; Dudar, 1993 ; Yavuz *et al.*, 1998 ; Baccino *et al.*, 1999). Ces études ont permis de déceler des différences entre populations et d'utiliser ces méthodes avec beaucoup plus de

précautions qu'auparavant. En revanche, les tests de validité pour les méthodes histologiques sur le matériel osseux et dentaire sont rares.

### **Analyse de la relation entre l'âge chronologique et les indicateurs de l'âge**

Dans la plupart des méthodes, l'étude de corrélation se fait par le test statistique du coefficient de corrélation «  $r$  ». Il donne la valeur de l'indicateur par rapport à l'âge, mais dans un sens général et théorique. Lorsque cette technique statistique est utilisée, «  $r$  » doit absolument être complété par un coefficient de détermination qui mesure la part réelle de l'âge sur l'indicateur, soit «  $r^2$  ». Ce dernier est très facile à calculer si les publications ne donnent que le coefficient de corrélation. Mais, pour que le coefficient de détermination soit valable, il faut que la distribution par âge soit homogène, information qui est rarement précisée. Indispensable aussi est la valeur du «  $p$  », qui est un indicateur de la force de la démonstration (Fisher, 1958). Cette valeur répond à la question : à quel point sommes-nous sûrs qu'il y a une corrélation entre les deux paramètres et que cette relation n'est pas due à l'effet de l'échantillon ? Or dans la plupart des publications, seul est donné le coefficient de corrélation et la valeur du «  $p$  » n'apparaît pas systématiquement.

### **Utilisation de techniques non appropriées**

#### ***L'utilisation de la régression : un manque de rigueur***

La plupart des méthodes d'estimation de l'âge ont recours à la régression linéaire, notamment le comptage des structures histologiques osseuses (Kerley, 1965 ; Ericksen, 1991 ; Stout, Paine, 1992) ou dentaires (Solheim, 1993 ; Kvaal, Solheim, 1995). Dans cette analyse statistique,  $x$  est l'indicateur d'âge et  $y$  l'âge chronologique. La calibration inverse permet d'obtenir l'âge de nouveaux individus à partir de la droite de régression obtenue, mais cette approche n'est pas sans biais systématique. Plus la corrélation est faible entre âge et indicateur, plus la pente est élevée ce qui simule une corrélation alors que l'âge des jeunes est sur-estimé et celui des vieux sous-estimé (Katz, Suchey, 1986 ; Aykroyd *et al.*, 1997). De plus, dans une régression, seule l'erreur standard simple (la dispersion des observations individuelles autour de la ligne de régression) a tendance à être considérée, ce qui ne correspond qu'à 66 % des observations (Rösing, Kvaal, 1998).

Biologiquement parlant, utiliser une calibration inverse pour estimer l'âge de nouveaux sujets est une erreur. Par exemple, ce n'est pas l'âge qui dépend du degré de synostose des sutures crâniennes mais bien le contraire (Bocquet-Appel, Masset, 1982). Il est plus juste d'employer une calibration classique (Lucy, Pollard, 1995 ; Aykroid *et al.*, 1999). Dans la calibration classique, la variable  $x$  indépendante, contrôlée, est

l'âge et y est, cette fois, l'indicateur. L'estimation est moins efficace mais elle comporte moins de biais. Biologiquement, cette façon de procéder est beaucoup plus logique, l'âge induit les changements biologiques et non l'inverse.

### ***L'utilisation des phases morphologiques***

Le traitement par phase correspondant à des classes d'âge ne se chevauchant pas, comme les méthodes basées sur l'extrémité sternale de la quatrième côte (Iskan *et al.*, 1984a, b) ou la surface auriculaire de l'*ilium* (Lovejoy *et al.*, 1985b), ne reflète pas la réalité. En effet, il suppose que les erreurs données par phase morphologique ou par classe d'âge sont fixes pour tous les individus, ce qui ne tient absolument pas compte de la vraie variabilité des phénomènes morphologiques.

Dans les études de recrutement funéraire, le biais fondamental est *l'attraction de la moyenne* que l'on observe dans les prédictions par régression linéaire et par âge moyen d'une phase morphologique. L'âge des individus vieux est sous-estimé et celui des jeunes sur-estimé. Cette tendance d'ordre méthodologique a été interprétée en terme de mortalité des populations du passé. Or, même avec une espérance de vie à la naissance de 25 ans, les tables de mortalité montrent des survivants au delà de 50 ans (Chamberlain, 2000).

## **Synthèse**

Reproductibilité des caractères, population de référence pas toujours identifiée, absence de validation de la méthode et système de prédiction inapproprié sont les écueils principaux inhérents à toutes les méthodes d'estimation de l'âge couramment utilisées. Si l'on y ajoute la variabilité des marqueurs de sénescence, nous ne sommes plus étonnés du constat d'échec permanent de l'estimation de l'âge au décès des adultes en paléanthropologie.

## **SOLUTIONS**

### **Choisir des indicateurs selon leur relation à l'âge**

Les méthodes les plus communément utilisées en paléanthropologie et en médecine légale sont les méthodes macroscopiques, elles sont sans coût financier et donnent des résultats rapides (Aykroid *et al.*, 1999). Les méthodes basées sur les structures histologiques de l'os et des dents ne sont pas plus fiables que les méthodes macroscopiques (Aiello, Molleson, 1993 ; Jankauskas *et al.*, 2001 ; Wittwer-Backofen, Biba, 2002). Longtemps, l'utilisation d'un matériel sophistiqué a savamment caché la

variabilité biologique et les problèmes inhérents à la méthodologie. La fiabilité de ces méthodes et la bonne conservation des structures histologiques sont remises en cause depuis quelques années (Jackes, 1992 ; Wallin *et al.*, 1994 ; Lucy *et al.*, 1995 ; Feik *et al.*, 1997 ; Rösing, Kvaal, 1998).

### **Nécessité d'une approche multi-factorielle ?**

L'utilisation de plusieurs critères est de plus en plus conseillée (Iscan, Boldsen, 1995 ; Meindl, Russel, 1997 ; Baccino *et al.*, 1999 ; Ubelaker, 2000 ). L'hypothèse de départ est que plus nous analysons d'indicateurs, plus nous avons d'informations. Mais, ces approches ont été testées et ne sont pas plus performantes que les méthodes utilisant des indicateurs isolés (Bocquet-Appel *et al.*, 1978 ; Saunders *et al.*, 1992 ; Molleson, Cox, 1993 ; Schmitt, 2001).

La première raison est la variabilité des phénomènes de sénescence selon les différentes parties du squelette (Kemkes-Grottenthaler, 1996). La seconde est l'utilisation de standards élaborés sur des populations de référence différentes pour chaque indicateur (Baccino *et al.*, 1991). En effet, dans ce cas, les biais et les inexactitudes des différentes méthodes se cumulent (Iscan, Loth, 1989 ; Milner *et al.*, 2000).

### **Choisir des populations de référence identifiées**

Pour développer une méthode d'estimation de l'âge fiable, il faut utiliser des ensembles osseux pour lesquels on possède une information fiable sur l'âge au décès (Iscan, Loth, 1989 ; Cox, 2000). Il faut favoriser l'étude de collections provenant de cimetières anciens. Mais, pour avoir une vision la plus large possible de l'évolution d'un indicateur avec l'âge, il faut aussi tenir compte de son évolution dans le temps et dans l'espace. Les collections de cimetières récents et les échantillons de médecine légale, d'âge connu, se révèlent utiles, même si dans ce dernier cas, il ne faut pas perdre de vue le caractère spécifique de la distribution par âge (Schmitt, 2001).

Les collections de référence d'âge connu ont été récemment recensées (Usher, 2002).

### **Choisir des effectifs représentatifs**

Pour tenir compte de la variabilité inter-individuelle, il faut que l'échantillon soit suffisamment représentatif. Les effectifs des méthodes d'estimation de l'âge courantes sont, en général, légèrement supérieurs à 100 individus pour les méthodes macroscopiques. Les méthodes histologiques sont basées sur des échantillons vraiment

restreints (*tabl. I*). Par conséquent, chaque âge (ou chaque classe d'âge) est peu représenté. Or, on observe que les méthodes basées sur des effectifs importants (Masset, 1982 ; Suchey, Katz 1986a) présentent une variabilité importante. Un petit échantillon montre moins de variabilité, mais cela ne signifie pas que l'indicateur est performant : il l'est uniquement pour l'échantillon en question. Une des solutions est l'amalgame de petits échantillons (Schmitt, 2001), ce qui permet d'avoir un effectif représentatif de chaque classe d'âge et d'intégrer une grande variabilité.

Auteurs	Indicateurs	N
Acsadi-Nemeskeri (1970)	sutures crâniennes, trabécules fémur, trabécules humérus, symphyse pubienne	105
Hanihara, Suzuki (1978)	symphyse pubienne	70
Meindl <i>et al.</i> (1985)	symphyse pubienne	130/131
Suchey, Katz (1986)	symphyse pubienne	739
Pasquier <i>et al.</i> (1999)	symphyse pubienne	71
Kunos <i>et al.</i> (1999)	première côte	74
Iscan <i>et al.</i> (1984)	quatrième côte	118
Lovejoy <i>et al.</i> (1985b)	surface sacro-pelvienne iliaque	130/131
Masset (1982)	sutures crâniennes	921
Meindl, Lovejoy (1985)	sutures crâniennes	130/131
Walker, Lovejoy (1985)	remodelage clavicule, calcaneus	130/131
Kerley (1965)	remodelage osseux os longs	117
Stout, Stanley (1971)	remodelage osseux os longs	36
Ericksen (1991)	remodelage osseux os longs	264
Stout, Paine (1992)	remodelage osseux os longs	40
Stout <i>et al.</i> (1994)	remodelage osseux os longs	60
Yoshino <i>et al.</i> (1994)	remodelage osseux os longs	40
Gustafson (1950)	critères dentaires	41
Solheim (1988, 1990, 1992, 1993)	critères dentaires	100
Lamendin <i>et al.</i> (1992)	critères dentaires	208
Drusini <i>et al.</i> (1991)	critères dentaires	152
Drusini <i>et al.</i> (1990)	critères dentaires	70
Drusini <i>et al.</i> (1997)	critères dentaires	444
Stein, Corcoran (1994)	annulation cémentaire	42
Condon <i>et al.</i> (1986)	annulation cémentaire	80

*Tabl. I - Effectifs des échantillons de référence d'une série de méthodes d'estimation de l'âge au décès des individus adultes.*

*Tabl. I - Number of reference samples of a series of estimation methods for age of death of adult individuals.*

### Veiller à la distribution par âge de l'échantillon de référence

L'effet de la distribution par âge est minime si le coefficient de corrélation entre l'âge chronologique et l'indicateur de l'âge est proche de 0.9 (Bocquet-Appel, Masset, 1982, 1996 ; Masset, 1993 ; Rösing, Kvaal, 1998), mais étant donné la variabilité de la sénescence, ce n'est jamais le cas. Par conséquent, lorsqu'une méthode est appliquée, le résultat de la distribution par âge estimé a tendance à ressembler à celui de la population de référence, ce qui présente un biais majeur (Bocquet-Appel, Masset, 1978).

Pour pallier ce problème, Masset (1982) propose d'utiliser une population dont la distribution par âge serait uniforme, possédant le même nombre d'individus dans chaque classe d'âge. Mais, les populations naturelles ne présentent jamais la même probabilité de mourir dans toutes les classes d'âge. L'uniformité de la distribution par âge est biologiquement impossible et hautement improbable (Buikstra, Konisberg, 1985 ; Konisberg, Frankenberg, 1992).

Une autre solution, pour ne pas être influencé par la structure par âge de la population de référence, est d'utiliser une distribution de l'âge au décès dérivée d'un modèle de mortalité paramétrique (Gowland, Chamberlain, 1999 ; Chamberlain, 2000 ; Milner *et al.*, 2000 ; Boldsen *et al.*, 2002 ; Holman *et al.*, 2002). On peut utiliser, par exemple, les tables de mortalité de Ledermann (1969) avec le choix d'une espérance de vie à la naissance de 30 ans, étant donné que les quotients de mortalité sont quasiment identiques, que l'on prenne une espérance de vie à la naissance de 20, 30 ou 50 ans (*fig. 1*).

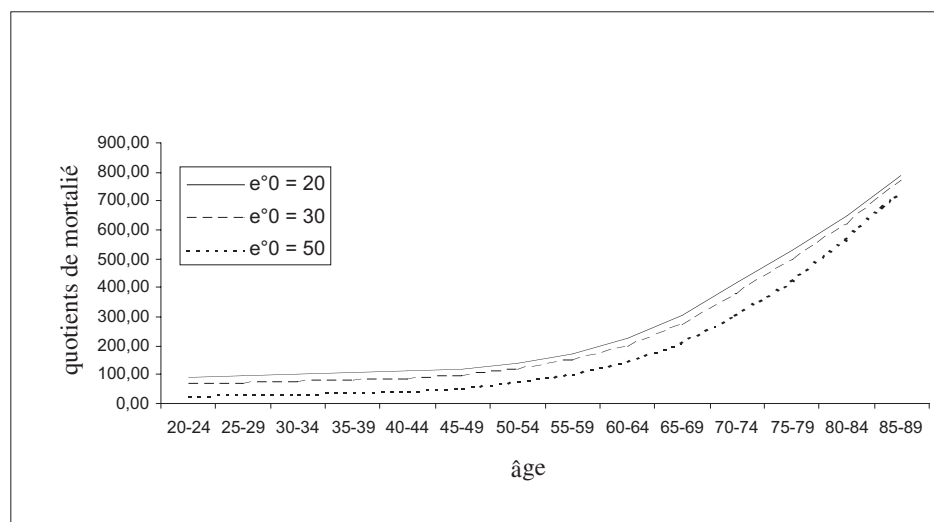


Fig. 1 - Quotients de mortalité en fonction de l'espérance de vie à la naissance ( $e_0$ ).

Fig. 1 - Mortality quotients according to life expectancy at birth ( $e_0$ ).

Cette démarche se justifie par les études démographiques et ethnologiques qui montrent que même en période de crise, lorsqu'on a atteint 20 ans, il est très probable d'en atteindre plus de 60 ans (Coale, Demeny, 1966 ; Ledermann, 1969 ; Blurton-Jones *et al.*, 2002).

### **Traiter les données en tenant compte de la variabilité**

Les phénomènes osseux ou dentaires liés à l'âge ne sont pas linéaires, il est donc nécessaire de chercher des traitements de données plus appropriés que ceux proposés dans les méthodes courantes. Un traitement probabiliste est, pour le moment, celui qui reflète le mieux ce phénomène. La première étude de ce genre a été faite par Masset (1982) sur les sutures crâniennes : les vecteurs de probabilité. Mais il s'agit d'une application essentiellement paléodémographique puisque l'estimation porte sur la population totale et non sur l'individu. La même proposition a été faite par Jackes (1985) et Rougé (1993) sur la symphyse pubienne pour proposer un âge individuel probable selon la phase morphologique. Lucy *et al.* (1996) ont proposé une approche probabiliste pour déterminer l'âge individuel à partir de plusieurs critères dentaires. Récemment, la surface auriculaire de l'*ilium* et la quatrième côte ont reçu un traitement probabiliste bayésien (Schmitt, Broqua, 2000 ; Schmitt, 2001). Les résultats montrent que l'estimation de l'âge au décès sous forme de probabilités permet de tenir compte de la variabilité. L'âge estimé est donné sous forme d'intervalles chronologiques larges qui ont, cependant, le mérite d'être fiable.

D'autres systèmes prédictifs différents de la statistique permettent de gérer des relations non linéaires entre variables. C'est le cas des réseaux de neurones artificiels. Leur intérêt en paléoanthropologie (Schmitt *et al.*, 2001) et leur potentiel dans le domaine de l'estimation de l'âge au décès (Amariti *et al.*, 2000 ; Schmitt, 2001) ont été démontrés.

### **CONCLUSION**

L'échec des méthodes courantes pour estimer l'âge au décès des individus adultes a deux sources. La première source d'erreur est la variabilité de la sénescence. Induisant un mode de sénescence qui dépend de l'hérédité et du milieu environnant pour chaque individu. Ensuite, les écueils méthodologiques limitent la performance des méthodes. Le manque de concordance entre les observateurs, des populations de référence inadéquates, une absence de validation sur des échantillons indépendants et des outils de prédictions non appropriés créent une accumulation des imprécisions et des biais.

Il faut donc favoriser la reproductibilité des méthodes d'observation de façon à ce qu'elles soient facilement applicables. L'étude des indicateurs et des méthodes doit englober plusieurs populations de zones géographiques différentes. L'effectif de ces échantillons doit être représentatif et sa distribution par âge conforme à la mortalité archaïque. La variabilité des modifications des indicateurs de l'âge nécessite des systèmes de prédictions adaptés, tels que les méthodes probabilistes.

#### BIBLIOGRAPHIE

- ACSÁDI (G.), NEMESKERI (J.) 1970, The complex method, in G. Acsádi, J. Nemeskeri (eds), *Human life span and mortality*, Akadémiai Kiado, Budapest, p. 122-135.
- AIELLO (L.C.), MOLLESON (T.) 1993, Are microscopic ageing techniques more accurate than macroscopic ageing techniques? *Journal of Archaeological Science* 20: 689-704.
- ALESAN (A.), MALGOSA (A.), SIMO (C.) 1999, Looking into the demography of an Iron Age population in the Western Mediterranean, I, Mortality, *American Journal of Physical Anthropology* 110: 285-301.
- ANGEL (J.L.) 1984, Variation in estimating age at death of skeletons, *Collegium Antropologium (Zagreb)* 8: 163-168.
- ARKING (R.) 1998, *Biology of Aging: Observations and Principles*, 2nd edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- ARLET (J.), MAZIÈRES (B.) 1985, Maladie hyperostotique, *Revue de Médecine Interne* 6 : 553-564.
- AMARITI (M.L.), RESTORI (M.), DE FERRARI (F.), PAGANELLI (C.), FAGLIA (R.), LEGNANI (G.) 2000, A histological procedure to determine dental age, *Journal of Forensic Odontostomatology* 18: 1-5.
- AYKROYD (R.G.), LUCY (D.), POLLARD (A.M.) SOLHEIM (T.) 1997, Technical note: regression analysis in adult age estimation, *American Journal of Physical Anthropology* 104: 259-265.
- AYKROYD (R.G.), LUCY (D.), POLLARD (A.M.), ROBERTS (C.A.) 1999, Nasty, brutish, but not necessarily short: a reconsideration of the statistical method used to calculate age at death from adult human skeletal and dental age indicators, *American Antiquity* 64: 55-70.
- BACCINO (E.), TAVERNIER (J.C.), LAMENDIN (H.), FRAMMERY (D.), NOSSINTCHOUK (R.), HUMBERT (J.F.) 1991, Recherche d'une méthode multifactorielle simple pour la détermination de l'âge des cadavres adultes, *Journal de Médecine Légale et Droit Médical* 34 : 27-33.
- BACCINO (E.), UBELAKER (D.H.), HAYEK (L.A.), ZERILLI (A.) 1999, Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains, *Journal of Forensic Sciences* 44: 931-936.
- BACHRACH (L.K.), HASTIE (T.), WANG (M.C.), NARASIMHAN (B.), MARCUS (R.) 1999, Bone mineral acquisition in healthy Asian, Hispanic, Black, and Caucasian youth: a longitudinal study, *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 84: 4702-4712.

- BANG (G.), MONSEN (R.) 1968, Möglichkeiten der Altersbestimmung durch Untersuchungen an Zähnen, *Deutsch Zahnärztl Z* 23: 934-936.
- BERGOT (C.), BOCQUET (J.P.) 1976, Étude systématique en fonction de l'âge de l'os spongieux et de l'os cortical de l'humérus et du fémur, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, série XIII : 215-242.
- BEUST (T.B.) 1931, Physiological changes in dentine, *Journal of Dental Research* 11: 267-275.
- BIELICKI (T.), SZKLARSKA (A.), WELON (Z.), ROGUCKA (E.) 2001, Variation in body mass index among Polish adults: effects of sex, age, birth cohort and social class, *American Journal of Physical Anthropology* 116: 166-170.
- BLURTON-JONES (N.G.), HAWKES (K.), O'CONNELL (J.F.) 2002, Antiquity of postreproductive life: are there modern impacts on hunter-gatherer postreproductive life spans, *American Journal of Human Biology* 14: 184-205.
- BOCQUENTIN (F.), SELLIER (P.), MURAIL (P.) 2001, La population natoufienne de Mallaha (Eynan, Israël) : dénombrement, âge au décès et recrutement funéraire, *Paléorient* 27 : 89-106.
- BOCQUET-APPEL (J.P.), BACRO (J.N.) 1997, Brief communication: estimates of some demographic parameters in a Neolithic rock-cut chamber using iterative techniques for aging and demographic estimators, *American Journal of Physical Anthropology* 102: 569-575.
- BOCQUET-APPEL (J.P.), MAIA NETO (M.A.), TAVARES DA ROCHA (M.A.), XAVIER DE MORAIS (M.H.) 1978, Estimation de l'âge au décès des squelettes d'adultes par régressions multiples, *Contribuções para o Estudo da Antropologia Portuguesa* 10: 107-167.
- BOCQUET-APPEL (J.P.), MASSET (C.) 1982, Farewell to paleodemography, *Journal of Human Evolution* 11: 321-333.
- BOCQUET-APPEL (J.P.), MASSET (C.) 1996, Paleodemography: expectancy and false hope, *American Journal of Physical Anthropology* 99: 571-583.
- BOLDSSEN (J.L.), MILNER (G.R.), KONISBERG (L.W.), WOOD (J.W.) 2002, Transition analysis: a new method for estimating age from skeletons, in R.D. Hoppa, J.W. Vaupel (eds), *Paleodemography, Age distribution from skeletal samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 73-106.
- BOWEN (V.), CASSIDY (D.) 1981, Macroscopic and microscopy anatomy of the sacro-iliac joint from embryonic life until the eighth decade, *Spine* 6: 620-628.
- BRUNNER (C.), KISSLING (R.), JACOB (H.A.) 1991, The effects of morphology and histopathologic findings on the mobility of the sacro-iliac joint, *Spine* 16: 1111-1117.
- BUIKSTRA (J.E.), KONISBERG (L.W.) 1985, Paleodemography: critiques and controversies, *American Anthropologist* 87: 316-333.
- CHAMBERLAIN (A.) 2000, Problems and prospects in paleodemography, in M. Cox, S. May (eds), *Human Osteology in Archeology and Forensic Science*, Greenwich Medical Media, London, p. 101-115.
- CHO (H.), STOUT (S.D.), MADSEN (R.W.), STREETER (M.) 2002, Population-specific histological age-estimating method: a model for known African-American and European-American skeletal remains, *Journal of Forensic Sciences* 47: 12-18.

- COALE (A.J.), DEMENY (P.) 1966, *Regional model life tables and stable populations*, Princeton University Press, Princeton.
- COHEN (M.M.) 1993, Sutural biology and the correlates of craniosynostosis, *American Journal of Medical Genetics* 47: 581-616.
- COMFORT (A.) 1979, *The Biology of Senescence*, 3rd ed., Churchill Livingstone, Edinburgh.
- CONDON (K.), CHARLES (K.), CHEVERUD (J.M.), BUIKSTRA (J.E.) 1986, Cementum annulation and age determination in *Homo sapiens*, II, Estimates and accuracy, *American Journal of Physical Anthropology* 71: 321-330.
- COX (M.) 2000, Ageing adults from the skeleton. in M. Cox, S. Mays (eds), *Human Osteology in Archeology and Forensic Science*, Greenwich Medical Media, London, p. 61-81.
- CRUBÉZY (E.), CAUSSE (L.), DELMAS (J.), LUDES (B.) 1998, *Le paysan médiéval en Rouergue : cimetière et église de Carnac (Campagnac, Aveyron)*, Guide d'Archéologie n° 5, Musée Archéologique de Montrozier.
- DAVIS (J.W.), NOVOTNY (R.), WASNICK (R.D.), ROSS (P.D.) 1999, Ethnic, anthropometric, and lifestyle associations with regional variations in peak bone mass, *Calcified Tissue International* 65: 100-105.
- DREIER (F.G.) 1994, Age at death estimates for the protohistoric Arikara using molar attrition rates: A new quantification method, *International Journal of Osteoarchaeology* 4: 137-147.
- DRUSINI (G.A.), VOLPE (A.), DOVIGO (S.) 1990, Age determination in human adults by dental histology, *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* 78: 169-174.
- DUDAR (J.C.) 1993, Identification of rib number and assessment of intercostal variation at the sternal rib end, *Journal of Forensic Sciences* 38: 788-797.
- DUTOUR (O.) 1986, Enthesopathies (lesions of muscular insertions) as indicators of the activities of Neolithic Saharan populations, *American Journal of Physical Anthropology* 71: 221-224.
- DYER (C.A.E.), SINCLAIR (A.J.) 1998, The premature ageing syndromes: insights into the ageing process, *Age and Ageing* 27: 73-80.
- EPKER (B.N.), KELIN (M.), FROST (H.M.) 1965, Magnitude and location of cortical bone loss in human rib with aging, *Clinical Orthopaedics* 41: 198-203.
- ERICKSEN (M.F.) 1991, Histological estimation of age at death using the anterior cortex of the femur, *American Journal of Physical Anthropology* 84: 171-179.
- FEIK (S.A.), THOMAS (C.D.L.), CLEMENT (J.G.) 1997, Age-related changes in cortical porosity of the midshaft of the human femur, *Journal of Anatomy* 191: 407-416.
- FOURNIÉ (B.) 1993, The enthesic region: an extended approach to the concept of "enthesis", *Presse Médicale* 22: 1767-1769.
- FROST (H.M.) 1988, Vital biomechanics: proposed general concepts for skeletal adaptations to mechanical usage, *Calcified Tissue International* 42: 145-156.
- GOWLAND (R.L.), CHAMBERLAIN (A.T.) 1999, The use of prior probabilities in ageing perinatal skeletal remains: implications for the evidence of infanticide in Roman-Britain, *American Journal of Physical Anthropology*, suppl. 28: 138-139.
- HAN (Z.H.), PALNITKAR (S.), SUKHAKER (R.D.), NELSON (D.), PARFITT (A.M.) 1997, Effects on ethnicity and age or menopause on the remodeling and turnover of iliac bone:

- implications for mechanisms of bone loss, *Journal of Bone and Mineral Research* 12: 498-507.
- HARPER (G.J.), CREWS (D.E.) 2000, Aging, Senescence, and Human Variation, in S. Stinson, B. Bogin, R. Huss-Ashmore, D. O'Rourke (eds), *Human Biology, An evolutionary and biocultural perspective*, Wiley-Liss, New York, p. 465-505.
- HAYFLICK (L.) 1998, How and why we age, *Experimental Gerontology* 33: 639-653.
- HOLMAN (D.J.), WOOD (J.W.), O'CONNOR (K.A.) 2002, Estimating age-at-death distributions from skeletal samples: a multivariate latent-trait approach, in R.D. Hoppa, J.W. Vaupel (eds), *Paleodemography, Age distribution from skeletal samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 193-221.
- HOPPA (R.D.) 2000, Population variation in osteological aging criteria: an example from the pubic symphysis, *American Journal of Physical Anthropology* 111: 185-191.
- ISCAN (M.Y.) 1987, Racial variation on the sternal extremity of the rib and its effect on age determination, *Journal of Forensic Sciences* 32: 452-466.
- ISCAN (M.Y.) 1998, Progress in forensic anthropology: 20th century, *Forensic Science International* 98: 1-8.
- ISCAN (M.Y.), BOLDSSEN (J.L.) 1995, A statistical model of the rib phase method, *Rivista di Antropologia (Roma)* 73: 21-29.
- ISCAN (M.Y.), LOTH (S.) 1989, Osteological manifestation of age in the adult, in M.Y. Iscan, K.A.R. Kennedy (eds), *Reconstruction of life from the skeleton*, Wiley-Liss, New-York, p. 23-40.
- ISCAN (M.Y.), LOTH (S.R.), SCHEUERMAN (E.H.) 1992, Age assessment from the sternal end of the rib and pubis symphysis: a systematic comparison, *Anthropologie (Brno)* XXX: 41-44.
- ISCAN (M.Y.), LOTH (S.R.), WRIGHT (R.K.) 1984a, Age estimation from the rib by phase analysis, *Journal of Forensic Sciences* 29: 1094-1104.
- ISCAN (M.Y.), LOTH (S.R.), WRIGHT (R.K.) 1984b, 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.
- JACKES (M.) 1985, Pubic symphysis age distributions, *American Journal of Physical Anthropology* 68: 281-299.
- JACKES (M.) 1992, Paleodemography: problems and techniques, in M.S. Saunders, M.A. Katzenberg (eds), *Skeletal biology of past peoples: research methods*, Wiley-Liss, New York, p. 189-224.
- JACKES (M.) 2000, Building the bases for paleodemographic analysis: adult age determination, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss, New York, p. 417-466.
- JANKAUSKAS (R.), BARKAUSKAS (S.), BOJARUN (R.) 2001, Incremental lines of dental cementum in biological estimation, *Homo* 52: 59-71.
- JOHANSON (G.) 1971, Age determinations from human teeth, *Odontologisk Revy* 22, suppl. 2: 1-126.
- KAGERER (P.), GRUPE (G.) 2001, On the validity of individual age-at-death diagnosis by incremental line counts in human dental cementum, Technical considerations, *Anthropologischer Anzeiger* 59: 331-342.
- KATZ (D.), SUCHEY (J.M.) 1986, Age determination of the male os pubis, *American Journal of Physical Anthropology* 69: 427-435.

- KEMKES-GROTTENTHALER (A.) 1996, Critical evaluation of osteomorphognostic methods of estimate adult age at death: a test of the complex method, *Homo* 46: 280-292.
- KERLEY (E.R.) 1965, The microscopic determination of age in human bone, *American Journal of Physical Anthropology* 23: 149-164.
- KEY (C.A.), LESLIE (C.A.), MOLLESON (T.) 1994, Cranial suture closure and its implications for age estimation, *International Journal of Osteoarchaeology* 4: 193-207.
- KIRKWOOD (T.B.L.) 1995, The evolution of ageing, *Review in Clinical Gerontology* 5: 3-9.
- KIRKWOOD (T.B.L.) 1997, What is the relationship between osteoarthritis and ageing? *Baillière's Clinical Rheumatology* 11: 683-694.
- KIRKWOOD (T.B.L.), AUSTAD (S.N.) 2000, Why do we age? *Nature* 408: 223-238.
- KIRKWOOD (T.B.), RITTER (M.A.) 1998, Related articles on the interface between ageing and health in man, *Age Ageing* 26, suppl. 4: 9-14.
- KONISBERG (L.W.), FRANKENBERG (S.R.) 1992, Estimation of age structure in anthropological demography, *American Journal of Physical Anthropology* 89: 235-256.
- KONISBERG (L.W.), FRANKENBERG (S.R.) 2002, Deconstructing death in paleodemography, *American Journal of Physical Anthropology* 117: 297-309.
- KUNOS (C.A.), SIMPSON (S.W.), RUSSEL (K.F.), HERSHKOVITZ (I.) 1999, First rib metamorphosis: its possible utility for human age-at-death estimation, *American Journal of Physical Anthropology* 110: 303-323.
- KVAAL (S.), SOLHEIM (T.) 1995, Incremental lines in human dental cementum in relation to age, *European Journal of Oral Sciences* 103: 225-230.
- LAMENDIN (H.), HUMBERT (J.F.), TAVERNIER (J.C.), BRUNEL (G.), NOSSINTCHOUK (R.) 1990, Estimation de l'âge par une méthode à deux critères dentaires, *Le Chirurgien Dentiste Français* 539: 93-96.
- LANE (J.M.), RUSSELL (L.), KAHN (S.N.) 2000, Osteoporosis, *Clinical Orthopaedics* 372: 139-150.
- LAZENBY (R.A.), PFEIFFER (S.K.) 1994, Sex as a covariate in the analysis of bone remodeling, *American Journal of Physical Anthropology*, suppl. 18: 127.
- LEDERMANN (S.) 1969, *Nouvelles tables de mortalité*, INED, Travaux et documents n° 53, Presses Universitaires de France, Paris.
- LIEBERMAN (D.E.) 1993, Life history variables preserved in dental cementum microstructure, *Science* 261: 1162-1164.
- LOVE (B.), MÜLLER (H.G.) 2002, A solution to the problem of obtaining a mortality schedule for paleodemographic data, in R.D. Hoppa, J.W. Vaupel (eds), *Paleodemography, Age distribution from skeletal samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 181-192.
- LOVEJOY (C.O.), MEINDL (R.S.), MENSFORTH (R.P.), BARTON (T.J.) 1985a, Multifactorial determination of skeletal age at death: a method and blind tests of its accuracy, *American Journal of Physical Anthropology* 68: 1-14.
- LOVEJOY (C.O.), MEINDL (R.S.), PRYSBECK (T.R.), MENSFORTH (R.P.) 1985b, 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.
- LUCY (D.), AYKROYD (R.G.), POLLARD (A.M.), SOLHEIM (T.) 1996, A Bayesian approach to adult human age estimation from dental observations by Johanson's age changes, *Journal of Forensic Sciences* 41: 189-194.
- LUCY (D.), POLLARD (A.M.) 1995, Further comments on the estimation of error associated with the Gustafson dental age estimation method, *Journal of Forensic Sciences* 40: 222-227.
- LUCY (D.), POLLARD (A.M.), ROBERTS (C.A.) 1995, A comparison of three dental techniques for estimating age at death in humans, *Journal of Archaeological Science* 22: 417-428.
- LYNNERUP (N.), THOMSEN (J.L.), FROHLICH (B.) 1998, Intra- and inter-observer variation in histological criteria used in age at death determination based on femoral cortical bone, *Forensic Science International* 91: 219-230.
- MANDOJANA (J.M.), MARTIN DE LAS HERAS (S.), VALENZUELA (A.), VALENZUELA (M.), LUNA (J.D.) 2001, Differences in morphological age-related dental changes depending on postmortem interval, *Journal of Forensic Sciences* 46: 889-892.
- MASSET (C.) 1982, *Estimation de l'âge au décès par les sutures crâniennes*, Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 301 p.
- MASSET (C.) 1990, Où en est la paléodémographie ? *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s. 2 : 109-122.
- MASSET (C.) 1993, Encore l'âge des adultes, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s. 5 : 217-224.
- MAYS (S.) 1998, *The Archeology of Human Bones*, Routledge, London.
- MEDAWAR (P.B.) 1952, *An Unsolved Problem of Biology*, Lewis, London.
- MEINDL (R.S.), LOVEJOY (C.O.), MENSFORTH (R.P.), WALKER (R.A.) 1985, A revised method of age determination using the os pubis, with a review and tests of accuracy of other current methods of pubic symphyseal aging, *American Journal of Physical Anthropology* 68: 29-45.
- MEINDL (R.S.), RUSSEL (K.F.) 1997, Recent advances in method and theory in paleodemography, *Annual Review of Anthropology* 27: 375-399.
- MENKES (C.J.) 1995, Le contexte étiologique, in M. Lequesne, C.J. Menkes (éds), *Atlas de l'arthrose*, Negma Laboratoire, p. 66-71.
- MILNER (G.R.), WOOD (J.W.), BOLDSSEN (J.L.) 2000, Paleodemography, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss, New York, p. 467-497.
- MOLLESON (T.) 1995, Rates of ageing in the eighteenth century, in S.R. Saunders, A. Herring (eds), *Grave Reflections, Portraying the Past Through Cemetery Studies*, Canadian Scholars' Press, Toronto, p. 199-222.
- MOLLESON (T.), COX (M.) 1993, *The Spitafields project* (volume 2-Anthropology), CBA Research Report 86: 167-179.
- MOLNAR (S.) 1971, Human tooth wear, tooth function and cultural variability, *American Journal of Physical Anthropology* 34: 175-190.
- MÜLLER (H.G.), LOVE (B.), HOPPA (R.D.) 2002, Semiparametric method for estimating paleodemographic profiles from age indicator data, *American Journal of Physical Anthropology* 117: 1-14.
- MURAIL (P.) 1996, *Biologie et pratiques funéraires des populations d'époque*

- historique : une démarche méthodologique appliquée à la nécropole gallo-romaine de Chantambre*, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 267 p, inédit.
- MURPHY (T.) 1959, The changing pattern of dentine exposure in human tooth attrition, *American Journal of Physical Anthropology* 17: 167-178.
- NUTI (R.), MARTINI (G.) 1993, Effects of age and menopause on bone density of entire skeleton in healthy and osteoporotic women, *Osteoporosis International* 3: 59-65.
- PAQUIN (J.D.), REST (M.), MARIE (J.P.), MORT (J.S.), PIDOUX (I.), POOLE (A.R.), ROUGHLEY (P.J.) 1983, Biomechanical and morphologic studies of cartilage from the adult human sacroiliac joint, *Arthritis Rheumatism* 26: 887-895.
- PARFITT (A.M.), HAN (Z.H.), PALNITKAR (S.), SUKHAKER (R.D.), SHIH (M.S.), NELSON (D.) 1997, Effects of ethnicity and age or menopause on osteoblast function, bone mineralisation and osteoid accumulation in iliac bone, *Journal of Bone and Mineral Research* 12: 1864-1873.
- PAVELKA (M.S.M.), FEDIGAN (L.M.) 1991, Menopause: a comparative life history perspective, *Yearbook of Physical Anthropology* 34: 13-38.
- PENSLER (J.M.), LEDESMA (D.F.), HIJAWI (J.), RADOSEVICH (J.A.) 1995, Plagiocephaly: premature unilateral closure of the coronal suture: a potentially localized disorder of cellular metabolism, *Annals of Plastic Surgery* 32: 160-165.
- PEYRON (J.G.) 1987, Épidémiologie et génétique, in L. Simon, G. Loyau-Masson (éds), *L'arthrose : perspectives et réalités*, Masson, Paris, p. 12-17.
- PRINCE (D.A.), UBELAKER (D.H.) 2002, Application of Lamendin's adult dental aging technique to a diverse skeletal sample, *Journal of Forensic Sciences* 47: 107-116.
- RESNICK (D.), NIWAYAMA (G.) 1988, *Diagnosis of bone and joint disorders, Articular Diseases*, vol. 3, WB Saunders, Philadelphia.
- RESNICK (D.), NIWAYAMA (G.), GOERGEN (T.G.) 1975, Degenerative disease of the sacroiliac joint, *Investigative Radiology* 10: 608-621.
- RIZZOLI (R.), BONJOUR (J.P.) 1999, Determinants of peak bone mass and mechanisms of bone loss, *Osteoporosis International*, suppl. 2: S17-S23.
- ROBLING (A.G.), STOUT (S.D.) 2000, Histomorphometry of human cortical bone: applications to age estimation, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss, New York, p. 187-205.
- ROSE (M.R.) 1991, *Evolutionary Biology of Aging*, Oxford University Press, New York.
- RÖSING (F.W.), KVAAL (S.I.) 1998, Dental age in adults—a review of estimation methods, in K.W. Alt, F.W. Rösing, M. Teschler-Nicola (eds), *Dental Anthropology, Fundamentals, Limits, and Prospects*, Springer, Wien, New York, p. 443-468.
- ROUGÉ (D.) 1993, *Détermination du sexe et de l'âge de l'adulte au décès à partir des restes osseux : apports méthodologiques appliqués à l'étude des nécropoles médiévales*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 478 p, inédit.
- SANTOS (A.L.) 1996, How old is this pelvis? A comparison of age at death estimation using the auricular surface of the ilium and os pubis, *Aspects of African Archeology, Papers from the 10th Congress of the Pan African Association for Prehistory and Related Studies*, p. 29-36.

- SASHIN (D.) 1930, A critical analysis of the anatomy and the pathologic changes of the sacro-iliac joints, *Journal of Bone and Joint Surgery* 12: 891-910.
- SAUNDERS (S.R.), FITZGERALD (C.), ROGERS (T.), DUDAR (C.), MC KILLOP (H.) 1992, A test of several methods of skeletal age estimation using a documented archaeological sample, *Canadian Society of Forensic Science* 25: 97-118.
- SCHÄCHTER (F.) 1998, Causes, effects and constraints in the genetics of human longevity, *American Journal of Human Genetics* 62: 1-9.
- SCHMITT (A.) 2001, Variabilité de la sénescence du squelette humain, Réflexions sur les indicateurs de l'âge au décès : à la recherche d'un outil performant, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 347 p.
- SCHMITT (A.), BROQUA (C.) 2000, Approche probabiliste pour estimer l'âge au décès à partir de la surface auriculaire de l'ilium, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s. 12 : 279-301.
- SCHMITT (A.), LEBLANC (B.), CORSINI (M.M.), LAFOND (C.), BRUZEK (J.) 2001, Les réseaux de neurones artificiels, Un outil de traitement de données prometteurs pour l'Anthropologie, *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, n.s. 13 : 143-150.
- SCHMITT (A.), MURAIL (P.), CUNHA (E.), ROUGÉ (D.) (sous-press), Variability of the pattern of aging on the human skeleton: evidence from bone indicators and implications on age at death estimation, *Journal of Forensic Sciences* 47.
- SCHULTING (R.J.) 2001, Dating women and becoming farmers: new paleodietary and AMS dating evidence from the Breton Mesolithic Cemeteries, *Journal of Anthropological Archaeology* 20: 314-344.
- SCOTT (E.C.) 1979, Dental wear scoring technique, *American Journal of Physical Anthropology* 51: 213-218.
- SLAUS (M.) 2000, Biocultural analysis of sex differences in mortality profiles and stress levels in the Late Medieval population from Nova Raca, Croatia, *American Journal of Physical Anthropology* 111: 193-209.
- SOHLEIM (T.) 1993, A new method for dental age estimation in adultes, *Forensic Science International* 59: 137-147.
- SOLHEIM (T.), KVAAL (S.) 1993, Dental root surface structure as an indicator of age, *Journal for Odonto-Stomatology* 11: 9-21
- STEWART (J.H.), MC CORMICK (W.F.) 1984, A sex- and age- limited ossification pattern in human costal cartilages, *American Journal of Clinical Pathology* 81: 765-769.
- STOUT (S.D.), PAINE (R.R.) 1992, Brief communication: histological age estimation using rib and clavicle, *American Journal of Physical Anthropology* 87: 111-115.
- SUCHEY (J.M.), WISELEY (D.V.), KATZ (D.) 1986, Evaluation of the Todd and Mc Kern Stewart methods for aging the male os pubis in K.J. Reichs (ed.), *Advances in the Identification on Human Remains*, Charles Thomas Publisher, Springfield, p. 33-67.
- SUSANNE (C.) 1986, Sénescence : effets anthropologiques, in D. Ferembach, C. Susanne, M.C. Chamla (éds), *L'Homme, son évolution, sa diversité*, 3<sup>e</sup> édition, Éditions du CNRS, Paris, p. 369-382.
- TORNECK (C.D.) 1990, The clinical significance and management of calcific pulp obliteration. *Alpha-Omega* 83: 50-54.
- UBELAKER (D.H.) 2000, Methodological consideration in the forensic applications of human skeletal biology, in M.A. Katzenberg, S.R. Saunders (eds), *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, Wiley-Liss, New York, p. 41-67.

- USHER (B.M.) 2002, Reference samples: the first step in linking biology and age in the human skeleton, in R.D. Hoppa, J.W. Vaupel (eds), *Paleodemography, Age distribution from skeletal samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 29-47.
- VAN REENEN (J.F.) 1982, The effects of attrition on tooth dimensions of San (Bushmen), in B. Kurten (ed.), *Teeth: form, function and evolution*, Columbia University Press, New York, p. 182-203.
- VAUPEL (J.W.), CAREY (J.R.), CHRISTENSEN (K.), JOHNSON (T.), YASHIN (A.I.), HOLM (N.V.), IACHINE (I.A.), KANNISTO (V.), KHAZAELI (A.A.), LIEDO (P.), LONGO (V.D.), ZENG (Y.), MANTON (K.G.), CURTSINGER (J.W.) 1998, Biodemographic trajectories of longevity, *Science* 280: 855-860.
- WALKER (P.L.), DEAN (G.), SHAPIRO (P.) 1991, Estimating age from tooth wear in archaeological populations, in S. Hillson (ed.), *Dental anthropology*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 169-178.
- WALLIN (J.A.), TZOCK (I.), KRISTENSEN (G.) 1994, Microscopic age determination of human skeletons including an unknown but calculable variable, *International Journal of Osteoarchaeology* 4: 353-362.
- WITTWER-BACKOFEN (U.), BUBA (H.) 2002, Age estimation by tooth cementum annulation: perspectives of a new validation study, in R.D. Hoppa, J.W. Vaupel (eds), *Paleodemography, Age distribution from skeletal samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 107-128.
- WOOD (J.W.), MILNER (G.R.), HARPENDING (H.C.), WEISS (K.M.) 1992, The osteological paradox, *Current Anthropology* 33: 343-370.
- YAVUZ (M.F.), ISCAN (M.Y.), CÖLOGLU (A.S.) 1998, Age assessment by rib phase analysis in Turks, *Forensic Science International*, 98: 47-54.