Chapitre 15

La cémentochronologie

Stephan Naji[1], Lionel Gourichon[2], William Rendu[3]
1- CNRS-UMR 5199 PACEA, Université de Bordeaux 1, France
2- CNRS-UMR 7264 CEPAM, Université Nice Sophia Antipolis, France
3- CNRS-UMI 3199 CIRHUS, New York, États-Unis

15.1 Introduction

La Cémentochronologie est une méthode d'étude des marques de croissance au sein du cément des dents de mammifères. C'est une branche de la Squelettochronologie [1] qui s'intéresse à l'étude des mêmes marqueurs au sein des éléments squelettiques des vertébrés, elle-même s'intégrant dans la Sclérochronologie qui étudie l'ensemble des tissus durs chez les animaux [2].

Développée à l'origine pour le suivi des populations animales actuelles, la cémentochronologie est appliquée depuis plusieurs décennies en archéologie pour la détermination de l'âge et de la saison de mort des animaux exploités par les populations passées. Cette technique est aussi appliquée en anthropologie médico-légale et biologique. Pour cela elle se fonde sur une double caractéristique de la croissance du cément : celle-ci est continue depuis l'apparition de la racine dentaire jusqu'à la chute de la dent ou la mort de l'individu et elle répond à un cycle annuel qui voit se succéder des dépôts à vitesse de croissance variable et liée au métabolisme. Ainsi le dénombrement des paires de dépôts permet une estimation de la durée de vie de l'animal, alors que l'identification de la nature du dernier dépôt conduit à en inférer la saison de mort.

15.2 Bref historique

Dès la deuxième moitié du 19^{e}siècle des premiers travaux s'intéressent aux modalités de croissance du cément, établissant notamment la continuité de cette dernière durant la vie des individus concernés. C'est à partir de la deuxième moitié du 20^{e} siècle que la cémentochronologie connaît ses réels débuts avec une première application aux mammifères marins [3] avant d'être généralisée aux espèces terrestres (*e.g.* l'élan [4],

le renne [5], le cerf élaphe [6]). Depuis, ces études pionnières ont été suivies par un nombre important de travaux appliqués à plusieurs dizaines d'espèces.

Les premières applications à l'archéologie sont réalisées dès les années soixante [7] mais c'est surtout au cours des années quatre-vingt-dix que la méthode connaît son plus fort développement à la fois en termes de référentiels établis (*e.g.*le renne [8, 9], le cerf élaphe [10], le cheval [11]), d'avancées méthodologiques (apport de l'imagerie informatique [12], approche taphonomique [13, 14]) et de nouvelles problématiques (approche multi-marqueurs [15], reconstitution paléoenvironnementale [16], ethnoarchéologie [17,18]).

15.3 Objectifs et principes

La compréhension des phénomènes de croissance du cément dentaire chez la plupart des mammifères permet aujourd'hui d'aborder deux questions essentielles : l'estimation de l'âge de l'individu au moment de sa mort et l'estimation de la saison au cours de laquelle a eu lieu cet évènement. Pour traiter ces questions avec rigueur, il est impératif de parfaitement comprendre la nature du cément, les mécanismes régissant sa formation, sa croissance, et les facteurs endogènes et exogènes pouvant influer sur ces paramètres.

15.3.1 Description du cément et de la cémentogenèse

Le terme « cément » désigne l'ensemble des tissus conjonctifs minéralisés retrouvés sur la surface externe de la racine d'une dent ainsi que sur certaines zones de l'émail [19]. Il appartient à deux unités fonctionnelles, la dent et le parodonte[20], et constitue avec l'os alvéolaire le point d'attache essentiel du ligament parodontal (ou alvéolodentaire, dit aussi desmodonte ; Figure 1). La composition du cément, en poids relatif, comparable à celle de l'os, comprend une trame organique (fibres de collagène, 20 - 25 %), une phase minérale (cristaux d'hydroxyapatite, 60 - 65 %) et de l'eau (10 - 12 %) [19].

La classification internationale de référence retient cinq variétés de cément [21]. Nous ne retiendrons que les deux principaux pour notre propos : le cément acellulaire à fibres extrinsèques (CAFE) et le cément cellulaire à fibres intrinsèques (CCFI). La différence peut se résumer en quelques points : a) la présence (CCFI) ou non (CAFE) de *lacunae* et *canaliculi,* vestiges des cémentocytes ; b) un taux de développement régulier et lent (CAFE) ou rapide et irrégulier (CCFI) ; c) une fonction principale d'attache alvéolaire (CAFE) ou une fonction réactionnelle de réparation (CCFI). La combinaison de ces deux types peut produire un cément « mixte ». Ce cément appelé « cellulaire mixte stratifié (CCMS) » est défini soit par des inclusions ponctuelles de cémentocytes dans les couches de CAFE, soit par des couches de CAFE en alternance avec des couches de CCFI (Figures 2 et 3). Le cément acellulaire est le plus porteur d'information regardant l'âge et la saison de mort des individus et nous ne traiterons donc que celui-ci en détails.

Le CAFE, aussi nommé cément primaire ou fibrillaire, se forme simultanément à l'édification radiculaire. Il est composé de fibres extrinsèques, dit « de Sharpey »,

qui assurent l'attache de la dent au ligament parodontal [22](Figure 4). Le CAFE se développe essentiellement sur la moitié cervicale de la racine. Cependant, en fonction du nombre de racines des dents et selon les espèces, il peut être trouvé exclusivement sur l'ensemble de la longueur de la racine ou sur une plage très restreinte au niveau cervical. Chez certains mammifères hypsodontes comme le Cheval, ce type de cément est difficile à identifier car il peut contenir des cémentocytes sur tout son périmètre, jusqu'au sommet de la couronne [11, 23, 24]. Contrairement à l'émail et à la dentine, les mécanismes cellulaires et moléculaires responsables de la formation du CAFE (et des autres variétés de céments) ne sont pas encore totalement élucidés [22, 25]. Les deux phases d'élaboration du CAFE, pré-fonctionnelle et fonctionnelle, sont cependant parfaitement décrites chez la Souris [26] et chez l'Homme [22].

La phase préfonctionnelle, ou cémentogenèse primaire, correspond à l'attache initiale du cément sur la racine. Le premier temps assure l'implantation de courtes fibres conjonctives dans le manteau dentinaire grâce à la synthèse des fibres de collagène qui vont s'entremêler et établir de solides connexions avec les fibres non encore minéralisées de la surface dentinaire en voie de formation, au niveau de la future jonction dentinocémentaire [27]. Cette frange fibrillaire collagénique est très dense et perpendiculaire à la surface radiculaire [28]. Le réseau fibrillaire commence ensuite à se minéraliser, par déposition de cristaux d'hydroxyapatite dans les espaces de la trame [29], depuis la couche granulaire (ou zone granuleuse) dite «de Tomes» jusqu'à la surface externe de la racine, pour former la couche hyaline de Hopewell-Smith (dite aussi «cément intermédiaire»). Le front de minéralisation progresse de façon centrifuge en englobant les fibres extrinsèques du CAFE mais en épargnant les extrémités qui s'allongent simultanément selon un mécanisme inconnu [22].

Les cellules impliquées dans la synthèse du CAFE sont des cellules du tissu conjonctif qui bordent la surface radiculaire. Elles sont généralement désignées comme étant des cémentoblastes. Cependant elles diffèrent morphologiquement des cellules qui produisent les autres céments et qui ressemblent aux cellules conjonctives du ligament parodontal [22]. Au delà de leur nature, l'origine mésenchymateuse (follicule dentaire) ou épithéliale (gaine de Hertwig) de ces cellules cémentoprogénitrices est également controversée et il n'existe toujours pas de consensus scientifique sur cette question [27].

La phase fonctionnelle d'élaboration du CAFE débute lorsque l'édification radiculaire est quasiment achevée. A ce stade, les fibres de Sharpey sont en continuité avec les fibres principales du ligament parodontal qui s'étendent de la racine jusqu'à l'os alvéolaire. Ces fibres adoptent alors une orientation fonctionnelle perpendiculaire à la surface radiculaire ou selon un angle légèrement oblique. La phase fonctionnelle perdure ensuite tout au long de la vie, tant que le desmodonte est présent. Le CAFE croît en épaisseur à un rythme lent et régulier, estimé à 2 ou 3 μm par an pour l'Homme [22, 30, 31].

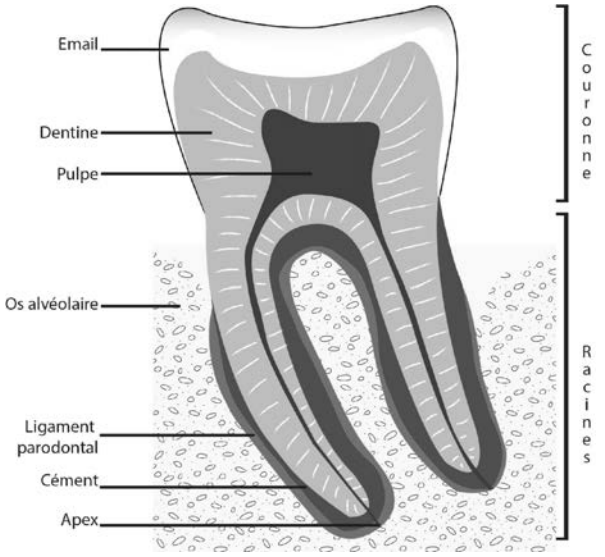


Figure 1 – Schéma anatomique d'une dent humaine présentant les différents tissus de la dent et du parodonte.

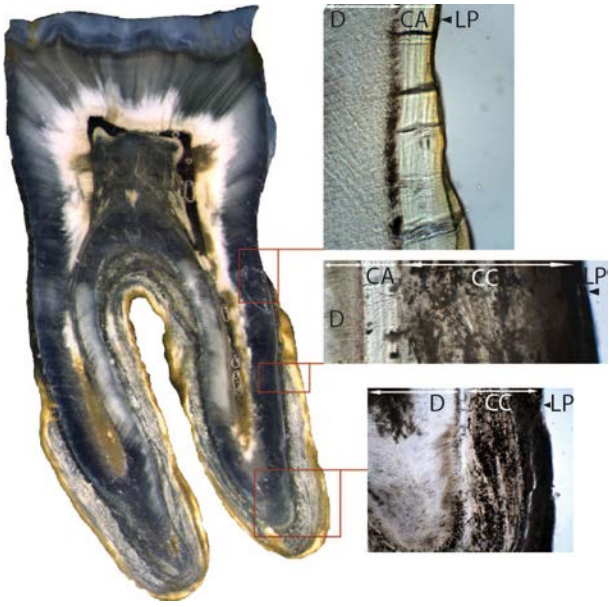


Figure 2 – (à gauche) Coupe histologique longitudinale d'une dent humaine avec grossissement des 3 différents types de cément. CA : cément acellulaire ; CC : cément cellulaire ; D : dentine ; LP : ligament parodontal.

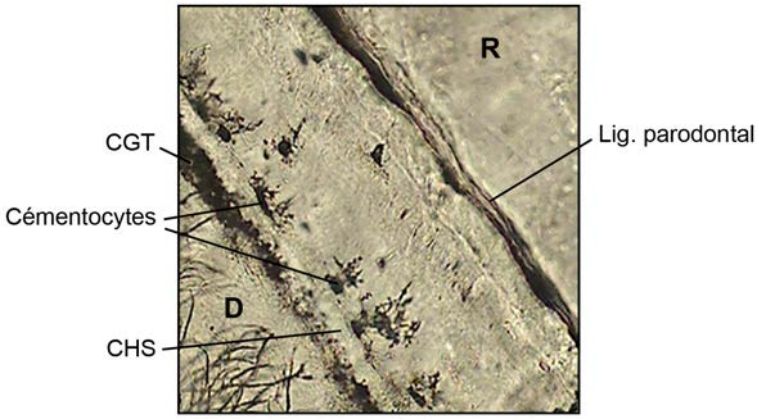


Figure 3 – (à droite) : Coupe histologique longitudinale d'une molaire de mouton moderne. Les premières couches de cément sont de type cellulaire. CGT : couche granulaire de Tomes ; CHS : couche hyaline de Hopewell-Smith ; D : dentine ; R : résine ; barre = 50 μm.

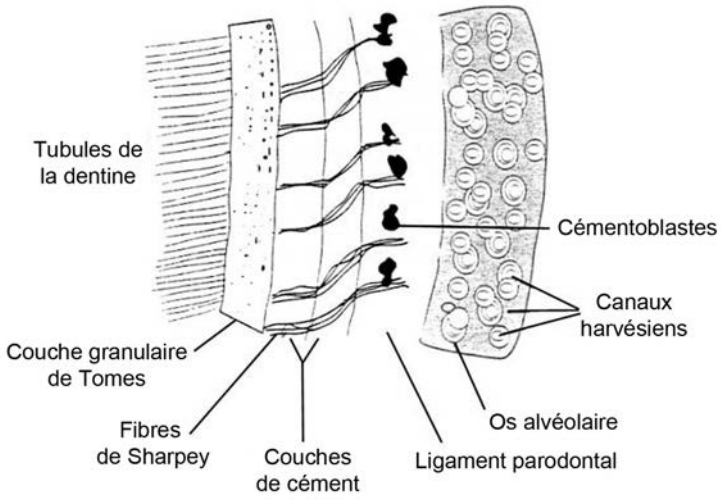


Figure 4 – Coupe schématique montrant la relation entre la dentine, le cément acellulaire, le ligament parodontal et l'os alvéolaire (d'après [12], fig. 6).

15.3.2 Corrélation entre le cément acellulaire et l'âge chez les mammifères

L'apposition du cément accellulaire étant continue et ce tissu étant rarement sujet au remodelage ou à la résorption, il fournit en principe un enregistrement régulier des épisodes qui affectent son développement [12]. Les variations dans la cémentogenèse produisent une superposition de couches de cément qui, chez un très grand nombre d'espèces de mammifères, sont corrélées avec la croissance saisonnière [10, 12, 32–37]. Ces dépôts successifs sont visibles au microscope sur des coupes longitudinales ou transversales de la dent de 20 à 100 μm d'épaisseur selon les espèces (Figure 5).

Depuis Magitot [38] et Black [39] à la fin du 19^{e} siècle, plusieurs études ont montré l'existence d'une corrélation entre l'épaisseur du cément et l'âge chronologique chez l'homme (Figure 6). Ce lien fut par la suite confirmé par d'autres auteurs [40 - 42] mais aucune donnée quantitative ne fut réellement disponible avant les travaux de Zander et Hürzeler [43]. Cependant, il faut encore attendre le début des années 80 [44] pour établir l'existence d'une corrélation entre le nombre de couches cémentaires et l'âge chronologique à partir de dents de sujets d'âge connus, extraites pour des raisons orthodontiques.

Depuis, une vingtaine d'études dans plus de sept pays ont indépendamment confirmé ces résultats avec des taux de corrélation ($r_{Pearson}$) publiés variant entre 0,7 et 0,9 [45 - 49]. Les raisons de cette corrélation sont encore inconnues. Ce qui est clair, c'est que ce phénomène est observable chez plus de 72 espèces de mammifères, dont l'Homme, sous différentes latitudes, avec différents types de dents (hypsodonte / brachyodonte), selon divers régimes alimentaires (herbivores, carnivores, omnivores) ou encore avec des mode de vies variées (hivernation) (*cf.* [32, 36, 50]). Dans tous les cas, le rythme semi-annuel des dépôts de cément se retrouve systématiquement, impliquant nécessairement un contrôle génétique beaucoup plus effectif que les influences environnementales extérieures.

15.3.3 Terminologie des structures de croissance du cément

De nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner les structures de croissance du cément comme « incréments, couches, bandes, anneaux, *annuli*, lignes ou zones » [2, 8, 9, 11, 36, 37, 51]. La plupart des termes spécifiques aux couches de cément sont anglophones mais des biologistes français [2, 52] ont proposé une terminologie commune aux diverses disciplines de la sclérochronologie. Ainsi, les couches de croissance (*increments*, *incremental structures*, *growth layers*, *growth bands*, en anglais) peuvent être définies généralement comme suit : « expression générale désignant l'ensemble des marques histomorphologiques formées dans les tissus durs en cours de croissance, quelles que soient leur structure ou leur signification fonctionnelle » [2].

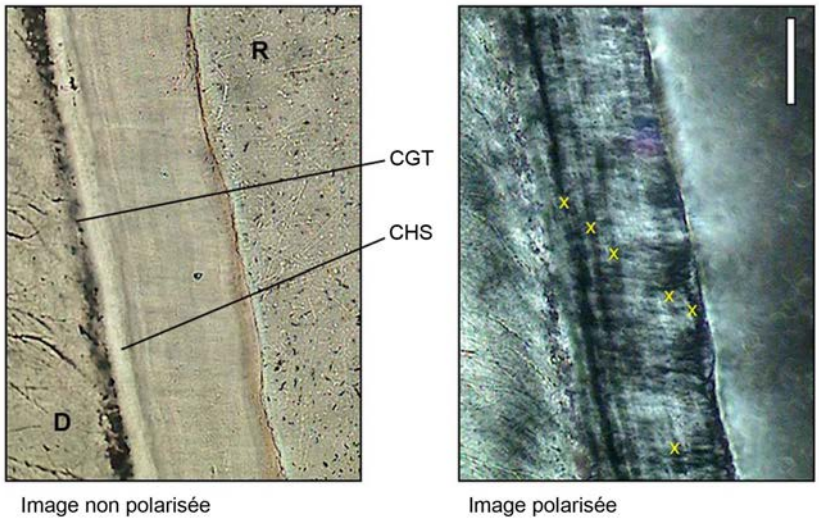


Figure 5 – Section de CAFE d'un mouton actuel. CGT : couche granuleuse de Tomes ; CHS : couche hyaline de Hopewell-Smith ; D : dentine ; R : résine ; barre = 50 µm

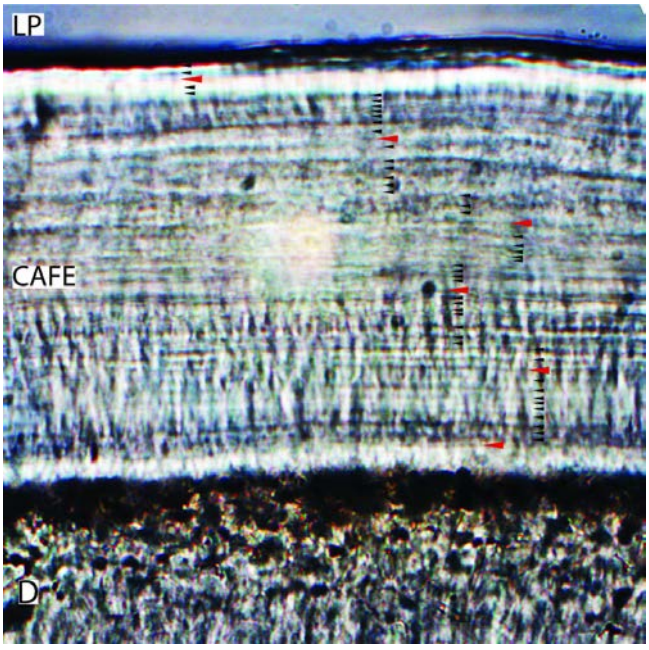


Figure 6 – Section de CAFE d'un sujet humain mort à 64 ans (52 lignes cémenteuses, âge estimé = 61 ans). D : dentine ; LP : ligament parodontal.

Le vocabulaire varie selon que l'on considère le mode de dépôt des différentes marques de croissance ou leurs propriétés optiques (sous lumière réfléchie ou transmise), la première option faisant généralement consensus. Les couches les plus larges correspondent à des « couches ou zones de croissance rapide » (ZC). Les couches plus étroites, qui marquent les discontinuités dans l'accrétion générale du cément, correspondent à une période de croissance ralentie. Elles sont appelées « *annuli* » ou « bandes hivernales » (*winter bands*), « ligne de repos » (*rest line*), parfois « lignes d'arrêt de croissance (LAC) » (terme plutôt utilisé pour les structures du périoste). Les bandes étroites contiendraient en général un taux plus élevé d'éléments minéraux que les bandes larges [24, 32, 53]. Cette minéralisation relative expliquerait en partie l'observation d'une alternance optique aussi bien sous lumière réfléchie que sous lumière transmise. D'autres lignes plus discrètes, nommées « faux » *annuli*, « lignes accessoires », « lignes secondaires » ou « lignes de résorption » selon les auteurs (*e.g.* [10, 36, 54, 55]), peuvent être également observées dans le cément.

Toutefois, la nature des structures de cément observées n'étant toujours pas complètement comprise, l'utilisation de termes impliquant des mécanismes biologiques trop précis comme « estivale / hivernale », « actif / repos », etc., n'est pas sans conséquence. Il est donc nécessaire de bien définir le protocole d'observation pour ensuite pouvoir décrire sans ambiguïté les structures histologiques observées. C'est sur le plan des propriétés optiques que peut survenir un certain nombre de confusions, en particulier selon le mode d'observation microscopique choisi (lumière réfléchie / transmise, ordinaire / polarisée). En règle générale, « un corps opaque apparaît clair (blanc) observé sous lumière naturelle réfléchie sur fond noir et sombre (noir) sous lumière transmise » [2, p. 444], et inversement pour un corps translucide. Ainsi, sous lumière transmise, les ZC apparaissent claires et les *annuli* foncés.

15.4 Causes et mécanismes

L'origine des marques de croissance présentes dans le cément et les mécanismes générant leur formation restent encore aujourd'hui très mal cernés, en raison principalement des difficultés à isoler et mesurer les divers paramètres environnementaux, génétiques et physiologiques susceptibles d'y participer. Les hypothèses qui ont pu être avancées sur cette question depuis la fin des années cinquante sont multiples (*cf.* [10, 36, 51]).

Chez la majorité des mammifères qui ont fait l'objet de recherches [36, 56], la formation des *annuli* est soumise à une périodicité annuelle et apparaissent en général à la fin de l'automne ou en hiver, au cours de la « mauvaise » saison, chez les espèces terrestres des régions tempérées ou arctiques. Si cette correspondance saisonnière n'est pas valable pour toutes les espèces vivant dans un même environnement, le phénomène semble néanmoins cyclique et synchrone pour une même population dans une région donnée.

Ainsi, la latitude apparaît comme un facteur de synchronisation : *e.g.*, la période de formation des *annuli* chez le cerf élaphe [10] et chez le mouton [7] en Nouvelle-Zélande, dans l'hémisphère sud, est exactement l'inverse de celle de leurs homologues européens et nord-américains vivant à la même latitude. Chez des espèces

habitant les régions équatoriales soumises à deux saisons des pluies par année [34, 35], il pourrait même exister un dépôt bimodal annuel du cément, *i.e.* deux *annuli* par an.

Selon certains auteurs, des processus physiologiques et bio-mécaniques liés à l'alimentation pourraient être à l'origine des structures de croissance du cément. L'étude expérimentale que Lieberman [51, 57] a menée sur des chèvres domestiques soumises à différents régimes alimentaires semble montrer que les différences optiques observées dans le cément seraient principalement dues à des variations microstructurelles dans la concentration des minéraux et dans l'orientation des fibres de collagène.

Sur le plan biomécanique, les dents subissent en effet de nombreuses contraintes lors des activités masticatrices et paramasticatrices susceptibles d'influencer l'apposition ou la résorption du cément. La sommation de ces contraintes induit une usure interproximale et occlusale des dents qui entraîne un changement de leur position et un remodelage des structures osseuses et cémentaires dans les trois plans de l'espace [58]. Lorsque l'occlusion reste fonctionnelle, les dents subissent ainsi différents types de migrations susceptibles d'influencer l'apposition du cément en fonction de la répartition des forces de tension et de compression : une éruption passive à tous les niveaux, une dérive mésiale au niveau postérieur et une bascule linguale au niveau antérieur [58, 59]. Les observations faites sur les dents de canidés soumis ou non à différents modes de contrôle humain [60, 61] montreraient que la captivité ou la domestication, qui favorisent une plus grande autonomie par rapport aux variations saisonnières de l'accès aux ressources, pourraient avoir, à des degrés divers, des influences indirectes sur la cémentogenèse.

Ainsi, d'après le modèle proposé par Lieberman [51, 57], les fluctuations saisonnières de l'alimentation, tant au niveau qualitatif que quantitatif, affecteraient à la fois l'état nutritionnel des animaux et l'exercice de la fonction masticatoire, et se reflèteraient donc dans la dynamique de croissance du cément et les propriétés optiques de ce dernier.

Cependant, Azaz et ses collaborateurs [62, 63] démontrèrent que l'apposition du cément sur des dents incluses était croissante et régulière au cours de la vie, mais à des degrés moindres que les taux observés sur des dents fonctionnelles. Ceci confirme les affirmations d'un certain nombre de chercheurs [21, 41, 42, 64] pour qui l'augmentation de l'épaisseur du cément n'est pas nécessairement tributaire de la fonction, contrairement aux résultats expérimentaux obtenus par Liebermann [51, 57].

Le modèle de Lieberman ne résout donc pas toutes les questions posées par la cémentochronologie. Même si ces déterminismes sont encore mal compris, l'accrétion différentielle du cément pourrait être déterminée à la fois par des facteurs endogènes (génétiques)agissant sur le métabolisme de base [7, 11, 36] et par des facteurs externes (alimentation, conditions environnementales) influant sans doute plus sur la vitesse du rythme d'apposition et le degré de minéralisation du cément.

15.5 Problèmes et limites de la méthode

La cémentochronologie offre de nombreux avantages pour l'estimation de la saison de mort par rapport aux méthodes classiquement utilisées. Ainsi, contrairement aux méthodes fondées sur l'usure et le remplacement dentaires ou sur l'état de maturation des bois de cervidés, la cémentochronologie s'applique à l'ensemble des individus d'une population sans distinction d'âge ou de sexe. De plus, elle a montré une meilleure reproductibilité que les méthodes classiques dans l'estimation de la saison de mort de certaines espèces (*e.g.* pour le Bison, voir [65]). Cependant cette méthode est encore utilisée de manière anecdotique en archéozoologie et en anthropologie en raison notamment de nombreuses limites dans son application aux spécimens archéologiques.

En plus des aspects techniques (destruction partielle ou totale des échantillons, etc.), ces limites sont de deux ordres : biologique (c'est-à-dire liée à la cémentogénèse elle-même) et taphonomique (découlant des conditions d'enfouissement et de préservation du matériel fossile).

15.5.1 Facteurs biologiques

Au sein des biais biologiques, on peut distinguer ceux qui vont directement affecter la détermination de l'âge au décès de ceux qui ont des conséquences sur l'estimation de la saison de mort.

Au cours de la cémentogenèse, une compaction des bandes de cément les plus internes a été identifiée [57]. Celle-ci peut aboutir à un écrasement, voire à la destruction de plusieurs structures, ce qui conduit alors à une sous-estimation de l'âge de l'individu concerné. Signalés dès le début de la méthode par les biologistes, de faux incréments peuvent apparaître au sein d'une séquence, augmentant ainsi artificiellement le nombre de paires de couches [6]. Ils sont caractérisés par une épaisseur plus faible et plus irrégulière que leurs homologues saisonniers et par une différence d'opacité avec ces mêmes dépôts (*e.g.* [36]). Ils ont été mis en relation avec le rut chez les Cervidés [6] et plus généralement avec le cycle reproductif [36] bien que certains auteurs remettent en cause cette origine [9]. Autre phénomène lié à une modification de la cémentogenèse, l'absence d'enregistrement saisonnier se caractérise par un dépôt de cément sans qu'il y ait formation d'*annulus*. Dans ce cas le dépôt n'est constitué que d'une zone. Ce phénomène n'a été qu'exceptionnellement observé et est associé à des conditions de stress intense, comme une chute drastique du nombre d'individus au sein d'une population [66].

Concernant l'estimation saisonnière, la source de biais principale est à chercher dans les fondements mêmes de la méthode. Cette estimation de la période de mort découle d'une part de l'identification de la nature du dernier dépôt et d'autre part de l'état de la croissance de ce dernier. Or, la cémentogénèse, étant un phénomène biologique, souffre par conséquent d'une certaine variabilité interindividuelle au sein d'une même population. Les travaux de Grue et Jensen [36], après analyse du CCFI de plusieurs taxons de carnivores (Canidés, Mustélidés, Ursidés et Félidés), montrent que la transition entre *annulus* et zone, bien que concentrée autour d'un pic pour la majorité des individus, est étalée dans le temps, parfois sur plusieurs semaines.

Se fondant sur la confrontation de différents référentiels sur les cervidés,Stutz [67] obtient les mêmes conclusions. Ainsi doit-on garder à l'esprit que cette transition, qui est à la base du raisonnement en cémentochronologie, n'est en rien un instantané à l'échelle de la population et que la croissance de certains animaux peut se révéler être sensiblement décalée dans le temps par rapport au schéma général de la population d'origine.

15.5.2 Facteurs taphonomiques

L'application de la cémentochronologie au contexte archéologique souffre de plusieurs limites inhérentes au matériel lui-même. Outre les problèmes de destruction de ce dernier et les enjeux de conservation, l'observation de structures micrométriques vieilles parfois de plusieurs milliers d'années n'est pas sans écueils.Comme tout tissu osseux, le cément peut être sujet à des remodelages lors des processus de fossilisation.

De par l'importance de la partie organique dans sa constitution et sa structuration en feuillet, le cément est l'un des premiers tissus touché par les agents météoritiques ou les cycles gel-dégel [68] qui ont des incidences directes sur sa préservation macroscopique. Les effets de la météorisation (ou *weathering*) ont été signalés dès les premières applications de la méthode au contexte archéologique (*e.g.* [37]). Son expression consiste dans l'apparition et le développement d'une fissuration de la racine et de plans de décollement au sein de la jonction dentine / cément (Figure 7). Cette zone correspond à un changement minéralogique et structural important et, en conséquence, constitue un plan de faiblesse. Un réseau de fissurations perpendiculaires, partant de la surface externe du cément jusqu'à la zone granuleuse de Tomes, peut également être généré. À terme, cette altération entraînera une perte de l'ensemble des dépôts de cément. De la même manière, les attaques chimiques vont affecter en premier lieu le cément, induisant sa complète disparition et l'impossibilité d'appliquer cette méthode sur les dents digérées ou régurgitées.

Les modifications microscopiques du cément ont été identifiées plus récemment. Tout comme les autres tissus minéraux, le cément peut être soumis à des dissolutions, des précipitations, des remplacements minéralogiques et des recristallisations des tissus. Pendant l'enfouissement et notamment sous l'effet des micro-organismes et de la moisissure, les fibres de collagènes peuvent se fragmenter et être dissoutes par les eaux d'infiltration au sein du sédiment. Les vides ainsi formés constituent des zones favorables aux précipitations de néo-cristaux d'apatite [69–71]. Ces modifications résultent en des perturbations localisées de l'enregistrement saisonnier impossible à identifier à l'œil nu. La perte de la structure peut entraîner une perte de l'enregistrement saisonnier et le développement d'un cément amorphe [70]. À l'inverse, les phénomènes de recristallisation peuvent recouvrir en partie des dépôts de cément préexistants et créer des pseudo-bandes qui auront les mêmes caractéristiques optiques au microscope polarisant avec analyseurs que les zones (ou dépôts à croissance rapide). Si ces recristallisations recouvrent plusieurs dépôts saisonniers, elles peuvent induire des erreurs dans l'estimation de l'âge. De la même manière, si le dernier dépôt de cément est concerné, l'estimation de la saison de mort peut en être affectée [67]. Ainsi, alors que les modifications macroscopiques peuvent être décelées

avant même la réalisation des lames minces, les modifications microscopiques nécessitent des méthodes adaptées pour pouvoir être décelées, sous peine de conduire à des erreurs d'analyse. Cette recherche de modification *post-mortem* appliquée pour la première fois sur le matériel dentaire de Kébara au Proche-Orient, a montré la fréquence importante de ce type d'atteintes sur les restes dentaires [72], conduisant au rejet d'un tiers de l'échantillon précédemment publié.

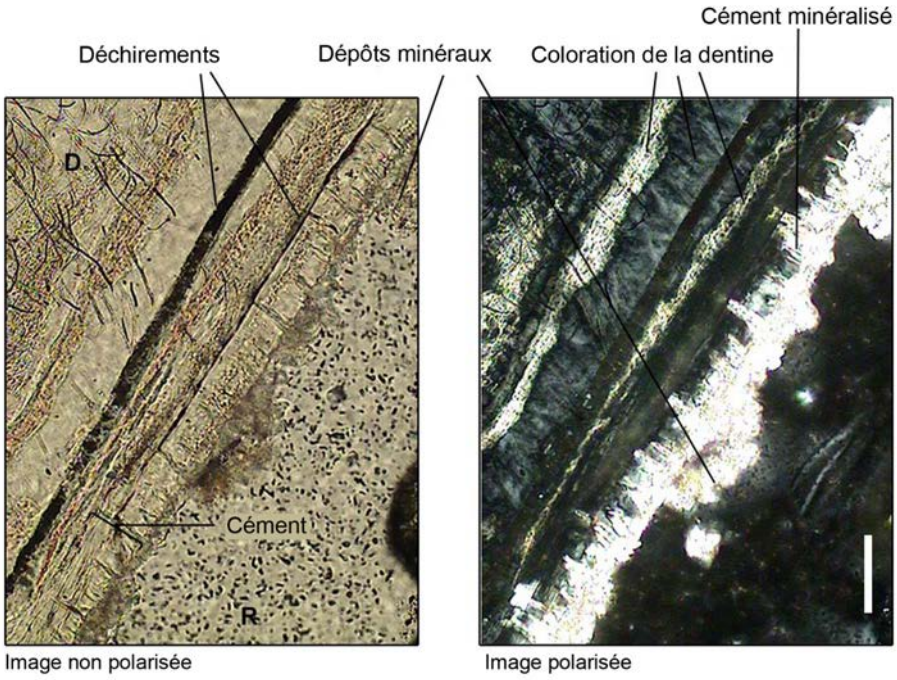


Figure 7 – Exemple d'une minéralisation excessive affectant le cément et la dentine sur une coupe histologique d'une molaire de gazelle. D : dentine ; R : résine ; barre = 50 µm.

15.6 Procédures techniques d'analyse

Le principe d'analyse est relativement simple car la structure histologique en couches du cément, observée en microscopie optique à lumière transmise, se présente comme une alternance de bandes uniformes sombres et claires observées sur une coupe transversale de racine dentaire. La somme de ces paires de couches, additionnée à l'âge d'éruption de la dent, permet d'estimer l'âge au moment de la mort. De plus, l'observation du dernier dépôt de cément permet d'identifier la saison de la mort.

15.6.1 Choix de l'échantillon

Toutes les dents des mammifères possèdent du cément et sont donc potentiellement porteuses d'informations sur l'âge et la saison de mort de l'individu. En archéozoologie, les prémolaires et les molaires sont les dents les plus utiles pour l'analyse du cément car, au contraire des incisives, elles sont plus souvent retrouvées encore

enchâssées dans l'os alvéolaire, ce qui garantit en théorie une meilleure protection de leurs racines et donc du cément. En anthropologie, les dents antérieures monoradiculées sont les plus recommandées car elles présentent la plus grande surface de CAFE observable.

On peut privilégier une dent particulière, comme la première molaire inférieure, pour éviter de recompter deux fois le même individu, mais ceci relève entièrement du choix du protocole d'échantillonnage pour le traitement des résultats futurs. Deux dents associées dans la même série dentaire peuvent par exemple être analysées afin de confirmer la validité (*i.e.* la reproductibilité) des observations pour un même individu.

La partie de la dent la plus importante pour l'examen microscopique se situe dans la moitié cervicale de la racine, près du collet, où se trouve généralement le CAFE. Chez l'homme, le tiers médian est privilégié pour éviter les altérations du cément dues aux parodontopathies. Pour bien mettre en évidence le CAFE, il est préconisé de réaliser des sections longitudinales, *i.e.* une découpe selon le plan sagittal passant par la base de la racine et le milieu de la couronne, de façon à pouvoir suivre le différentes marques de croissance sur un périmètre relativement important du cément, d'un bord à l'autre de la couronne. Les sections transversales sont quelquefois pratiquées sur les incisives et les canines mais leur emploi peut être source d'erreurs [33].

15.6.2 Préparation des lames minces

En biologie, la méthode généralement utilisée pour préparer des dents modernes est la technique des coupes histologiques. Cependant, cette procédure,qui nécessite la décalcification totale du spécimen, se prête mal aux dents archéologiques car le collagène y est parfois résiduel et la structure du cément ne tient alors plus qu'à l'organisation fragile des composants minéraux [55].

Depuis les années 80, la technique de préparation des lames minces dites « pétrographiques » est la plus communément employée pour la cémentochronologie appliquée à l'archéologie (*e.g.*[8, 10, 11, 54, 67, 72]). La procédure à suivre pour ce type de matériel archéologique doit tenir compte des recommandations suivantes à chaque étape de la préparation :

15.6.2.1 Extraction

Pour une meilleure manipulation, la dent peut être extraite de son alvéole osseuse, mais la partie de la mandibule ou du maxillaire contenant la dent sélectionnée peut être aussi prélevée en bloc par sciage. Dans les deux cas il convient d'éviter de fragiliser ou d'érafler la couche de cément qui peut être extrêmement fragile dans certains états de conservation.

15.6.2.2 Enrobage

Le spécimen est ensuite consolidé par immersion dans de la résine époxyde transparente, de préférence sans retrait et à température de polymérisation peu élevée. Avant le début de la polymérisation, il est recommandé de placer le moule pendant

quelques minutes dans un appareil d'imprégnation sous vide pour éviter la présence de bulles d'air entre la résine et la surface du cément.

15.6.2.3 Découpe

Une fois solide, le bloc de résine est ensuite découpé à l'aide d'une scie rotative à vitesse lente (Figure 8). Pour des sections longitudinales, le plan de coupe doit être le plus perpendiculaire possible par rapport à la surface de la racine, une obliquité même mineure étant susceptible d'entraîner des distorsions lors de la lecture microscopique des marques de croissance du cément. Selon la dimension du spécimen et l'épaisseur de la lame de scie, d'autres sections peuvent être réalisées à partir du même bloc. Pour des dents humaines monoradiculées, les sections doivent être réalisées sur le plan transversal, perpendiculaire à la surface de la dent [73].



Figure 8 – Sciage longitudinal d'une dent de gazelle archéologique enrobée dans de la résine époxy, à l'aide d'une scie rotative à vitesse lente.

15.6.2.4 Collage

Après abrasion de la face interne de la section pour éliminer les éventuelles traces de sciage, le spécimen est collé sur une lame de verre dépolie avec une résine appropriée.

15.6.2.5 Abrasion et polissage

Après séchage, l'autre face de l'échantillon est rodée à l'aide d'une rectifieuse automatique ou manuellement sur un dispositif abrasif à gros grain si la section est suffisamment mince, jusqu'à l'obtention d'une épaisseur de 60 à 80 μm. Un polissage à grain fin permet enfin d'atteindre l'épaisseur idéale de 20 à 60 μm selon la nature de la dent. Pour cette étape, il est utile de procéder à un contrôle régulier du résultat obtenu par observation de la lame au microscope à lumière transmise : *e.g.* la couche granulaire de Tomes doit être clairement visible et les tubules de la dentine ne pas apparaître comme trop nombreux ni trop rares dans l'épaisseur de la section. Les sections de dents humaines ne nécessitent pas de polissage ou d'abrasion si la coupe est directement réalisée entre 80-100 μm à l'aide d'une scie rotative à vitesse lente.

La totalité de ces opérations prend généralement entre 48 et 72 heures (temps de prise et de séchage compris), plusieurs spécimens pouvant être préparés dans le même temps.

15.6.3 Observation microscopique

Les lames minces de dents modernes et fossiles sont examinées à l'aide d'un microscope à lumière transmise polarisée croisée. Un grossissement de 40 ou 50 fois sous lumière polarisée suffit généralement pour obtenir une image nette des marques de croissance du cément chez les animaux, mais un grossissement plus important peut être requis pour vérifier certaines observations. A l'inverse, l'observation des structures chez l'homme nécessite un grossissement minimal de 200 à 400 fois.

L'observation des lames minces sous lumière transmise non polarisée permet dans un premier temps de reconnaître le cément acellulaire (CAFE) du cément cellulaire (CCFI), l'emplacement exact de la couche granulaire de Tomes, les dépôts étrangers superficiels, l'état général de conservation du cément (intégral, segmenté, décollé, etc.). Dans certains cas, des bandes contrastées sont déjà perceptibles dans le CAFE.

Ensuite, sous lumière polarisée, le phénomène d'alternance des bandes peut être clairement mis en évidence en orientant le bord de la dent selon un angle d'environ 40-45° par rapport à l'axe nord/sud du polariseur. Le périmètre entier du CAFE doit être inspecté afin de trouver les régions les plus favorables à la lecture des marques de croissance. La comparaison des deux images (polarisée et non polarisée) d'un même secteur est primordiale pour l'interprétation des couches de cément en ce qu'elle permet de prendre des points de repères (couche granulaire de Tomes, *annuli*, dépôts minéraux) avant le dénombrement et la mesure des couches annuelles.

Il convient de s'assurer de l'identité des couches de cément mises en évidence par des changements dans les propriétés optiques. Pour cela, il est souvent nécessaire d'accentuer le contraste différentiel des marques de croissance à partir du microscope en faisant varier l'intensité de la lumière, en modifiant le diaphragme ou en ajoutant un filtre vert ou bleu. Toute confusion aura pour conséquence une surestimation de l'âge de l'individu ou une estimation erronée de la saison de mort. La multiplication des observations sur différents secteurs du cément ou sur d'autres sections réalisées à partir du même spécimen permet de mieux identifier les problèmes potentiels et d'augmenter la fiabilité des interprétations.

Concernant les altérations taphonomiques, la principale différence optique qui existe entre les dépôts biogéniques et diagénétiques porte sur leur biréfringence. L'insertion d'un cristal biréfringent entre la lame mince et le polariseur va augmenter la différence de réfringence des deux cristaux et entraîner une coloration différentielle des dépôts qui permettra d'en identifier la nature [13] (Figure 9).

15.6.4 Protocoles d'interprétation

La difficulté de l'analyse du cément tient à plusieurs facteurs, parmi lesquels une connaissance imparfaite des mécanismes biologiques, la procédure d'échantillonnage et de préparation, la qualité du spécimen et la subjectivité de l'observateur [12]. Sur ce

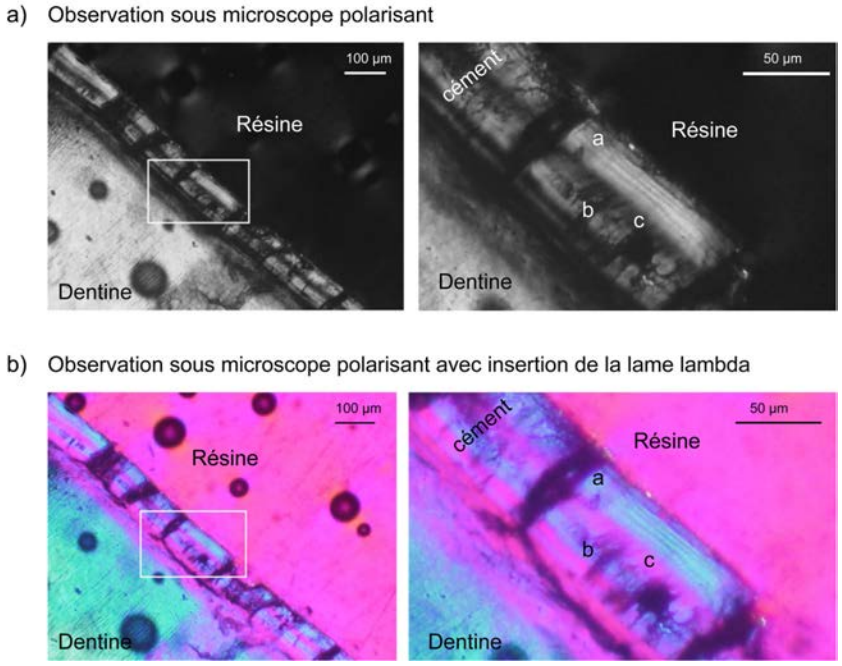


Figure 9 – Altérations taphonomiques observées dans le cément d'une dent de cerf provenant du gisement de Pech-de-l'Azé I (Dordogne), niveau 7. L'insertion de la lame lambda (clichés du bas) fait apparaître des propriétés optiques non visibles sous simple lumière polarisée (clichés du haut) : la partie externe du cément présente une coloration bleue (a), qui atteste de la conservation du collagène dans cette zone. À l'inverse, la partie la plus interne apparaît rose (b), témoignant d'une probable disparition du collagène. La ligne noire (c) semble résulter d'une disparition complète du collagène et aurait pu être confondue, si elle avait été plus fine, avec une bande de mauvaise saison en lumière polarisée analysée (d'après [80]).

dernier point, il est important de préciser que cette technique nécessite un minimum d'expérience pratique que l'on peut acquérir par des stages de formation auprès d'un spécialiste et par l'examen approfondi de divers cas d'étude comprenant aussi bien des spécimens modernes que du matériel archéologique. Néanmoins, quelles que soient les compétences du chercheur, l'estimation du nombre de marques de croissance ou de la nature de la dernière couche de cément est toujours susceptible de varier. Des tests à l'aveugle (échantillons rendus anonymes) et le recours à plusieurs observateurs permettent de remédier en partie à la subjectivité.

Grâce aux progrès conjoints de la microscopie et du numérique, l'exploitation informatique des images microscopiques constitue aujourd'hui une aide incontournable pour conserver, quantifier et vérifier la pertinence des observations en cémentochronologie. De nombreux logiciels permettent d'améliorer les qualités des images mais aussi de mesurer directement les dimensions des structures examinées. Des outils spécifiques comme les profils de luminance sont également très utiles pour analyser précisément l'alternance optique des couches du cément et leurs propriétés sur des transects disposés par exemple à intervalles réguliers entre la dentine et la couche la plus externe du cément [16, 54] (Figure 10). Cependant, l'utilisation de logiciels auto-

matisés de décompte du cément n'est toujours pas opérationnelle malgré plusieurs tentatives prometteuses en anthropologie [88].

Outre les informations concernant les éventuelles altérations post-dépositionnelles des structures cémenteuse et dentinaire, les principales données à enregistrer au moment de l'examen microscopique sont les suivantes : distance moyenne entre la couche granulaire de Tomes et le périmètre extérieur du cément, nombre de ZC et d'*annuli* complets observés, largeur moyenne de chaque ZC et de chaque annulus, largeur moyenne d'un couple ZC / *annulus*, nature de la dernière couche de cément, largeur moyenne de cette couche.

En archéozoologie comme en anthropologie, la plupart des auteurs utilisent simplement le nombre de cycles de croissance observés, *i.e.* le nombre de paires de marques (ZC + *annulus*), additionné à l'âge d'éruption de la dent [47, 48]. Pour l'Homme, même si c'est la moyenne des comptes qui est le plus souvent retenue, certains lui préfèrent le mode [49] ou le nombre maximum de lignes [74]. De même, les références pour l'âge d'éruption des dents varient selon les auteurs et certains utilisent même, plus justement d'ailleurs, l'âge de formation des deux tiers de la racine permanente qui correspond mieux au début de la phase fonctionnelle de la dent et donc au début des dépôts de CAFE. Bien que l'amplitude soit moindre (*e.g.*, de 1 à 12 mois environ pour les ongulés), cette variabilité existe aussi pour les dents d'animaux et il est donc nécessaire de disposer de référentiels fiables pour chaque espèce étudiée. Par ailleurs, lorsque l'âge d'éruption est bien établi, la nature de la première marque de croissance déposée permet dans certains cas de déterminer (ou de confirmer si elle est présumée) la saison de naissance de l'animal [75].

L'estimation de la saison de mort des animaux se fait d'après l'étude de la dernière bande de cément. Celle-ci doit être clairement identifiée et mesurée. Pour calculer la proportion de croissance de la dernière couche, la largeur moyenne des autres couches ou celle de la pénultième sont généralement prises comme référence. Il faut noter ici que la mesure peut être difficile à établir dans le cas d'un *annulus*, surtout chez les espèces où ce type de marque s'exprime sous la forme d'une fine ligne d'arrêt de croissance. Cette proportion est ensuite convertie en équivalence saisonnière (*e.g.*, début, milieu ou fin de saison chaude, début ou plein hiver, etc.) en se basant sur la période connue d'apposition de la couche (ZC ou *annulus*) pour le groupe animal en question (Figure 11). Lorsque les qualités optiques des spécimens archéologiques sont médiocres, la précision se limite parfois seulement à l'identification de la dernière bande de cément, ce qui induit des estimations relativement larges.

Pour l'estimation de la saison de la mort en anthropologie, seuls deux auteurs [76, 77] ont pour l'instant testés et appliqués cette méthode sur l'homme. Le premier [76] appliqua avec succès la méthode sur des sépultures eurasiennes de l'âge du Bronze en concordance avec les résultats obtenus d'après les analyses cémentochronologiques de dents d'ongulés et d'après l'analyse palynologique. Le second [77] a développé un test de validation de la méthode sur un large échantillon de dents humaines d'âge d'extraction connu avec des résultats supérieurs à 95 % d'identification positive de la saison de mort.

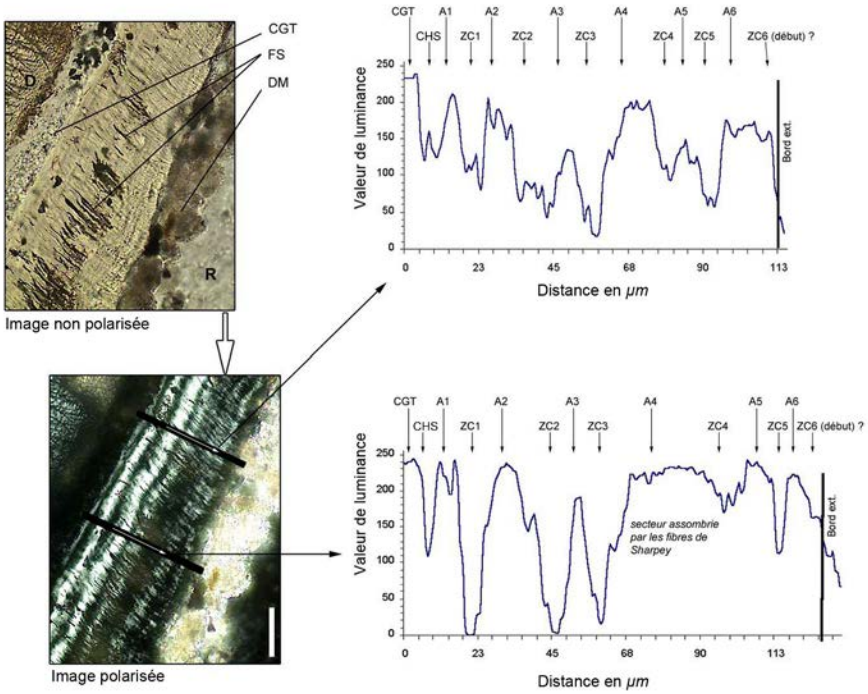


FIGURE 10 – Profils de luminance du cément établis à partir de deux transects sur image polarisée (molaire de mouton archéologique). A1, A2... : annuli ; D : dentine ; CGT : couche granulaire de Tomes ; DM : dépôts minéraux ; FS : fibres de Sharpey ; R : résine ; ZC1, ZC2. . . : zones de croissance.

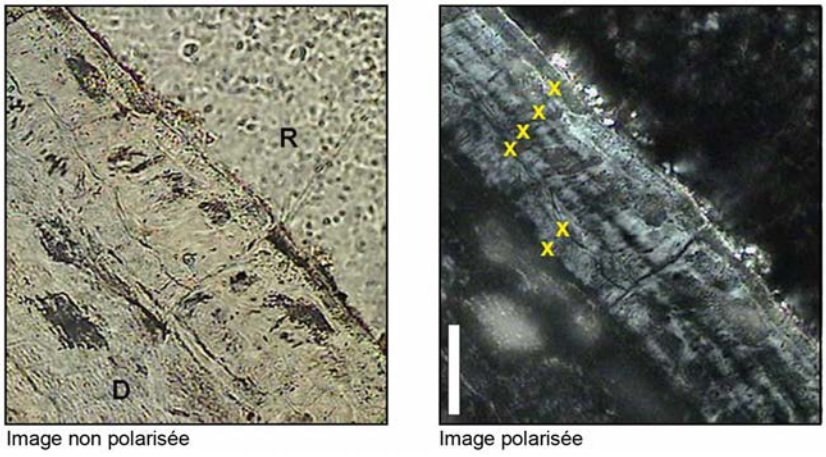


FIGURE 11 – Coupe histologique d'une troisième molaire inférieure de gazelle (site de Mureybet, 10e millénaire av. J.-C., Syrie). Croix jaunes : annuli. La dernière ZC est presque complète : individu probablement abattu à la fin de la saison sèche.

15.7 Cas d'étude

15.7.1 Les cerfs du site moustérien de Pech-de-l'Azé I (Dordogne)

Le site du Pech-de-l'Azé I présente trois ensembles archéologiques principaux (niveaux 4, 6 et 7) attribués aux MIS3 et ayant livré des industries du Moustérien de Tradition Acheuléenne (pour une synthèse, voir [78]). Sur ce site, les groupes néanderthaliens qui se sont succédé ont centré leur prédation sur le cerf. Or, bien que le taxon principal chassé ne change pas, l'étude archéozoologique a permis de démontrer une évolution dans la sélection des proies. Alors qu'au sein du niveau de base (niveau 4), mâles, femelles et jeunes ont été exploités, seuls les femelles et les jeunes sont attestés dans le niveau 6, et l'assemblage du niveau 7 semble ne résulter que de l'abattage de mâles. Au sein de cette espèce de cervidé, il existe une forte structuration sociale des groupes, femelles et jeunes vivant isolés des mâles une grande partie de l'année. La question de la période de prédation a été ainsi soulevée et des études cémentochronologiques ont été conduites sur le site pour savoir si les changements de proies pouvaient s'expliquer par une différence de saison de chasse.

Trente-et-une dents, représentant autant d'individus, soit 70 % du NMI, ont été analysées sur l'ensemble des niveaux [14, 79, 80]. Quelques remobilisations *post-mortem* des tissus saisonniers ont été identifiées conduisant au rejet de 5 individus. Alors qu'au sein du niveau 4 tous les stades de croissance du cément ont été identifiés, le dernier dépôt de cément des dents de l'ensemble 6 est systématiquement une zone en début de croissance, tandis que pour le niveau 7 c'est une zone en fin de croissance qui clôt l'enregistrement saisonnier de chacune des dents.

Les résultats cémentochronologiques obtenus témoignent donc ici d'une évolution des saisons de chasse avec, de la base au sommet, une chasse sur l'ensemble de l'année dans le niveau 4, une prédation dans la première moitié de la saison chaude dans le niveau 6 et à la fin de cette dernière dans l'ensemble 7. Il semble ainsi que l'évolution dans la sélection des proies puissent être mise en relation avec la saison de chasse : la chasse se concentrerait sur les cerfs mâles à la fin de la bonne saison, c'est-à-dire à la sortie du rut, pendant la mise en place du niveau 7. Lors de l'occupation du niveau 6, les Néanderthaliens se seraient concentrés sur les groupes matriarcaux au début de cette même saison, moment qui correspond à la période de mise bas et où ces groupes sont affaiblis physiquement et se déplacent moins. L'ensemble 4 pourrait correspondre soit à une chasse sur l'ensemble de l'année sans sélection, soit, au contraire, à la succession des deux schémas identifiés dans les deux autres niveaux archéologiques.

Dans cette étude, en plus de renseigner les périodes de prédation, les données de saisonnalité permettent de dégager des hypothèses quant aux choix effectués par les groupes humains. Ici, il semble que la facilité de la prédation ait été préférée à la qualité des proies.

15.7.2 Application en anthropologie

L'utilisation de la cémentochronologie en anthropologie est aujourd'hui principalement développée dans le milieu médico-légal comme estimateur d'âge, complémen-

taire des autres techniques traditionnellement utilisées. Cependant, la précision et la fiabilité de cette méthode sont de loin supérieures à tous les autres estimateurs ostéologique ou dentaire [81].

En archéologie, malgré quelques réticences souvent issues d'un manque d'expérience [82, 83], l'application de la cémentochronologie à des séries ostéologiques permet d'estimer une courbe d'âge au décès fiable et donc de discuter de certain paramètres paléodémographiques, inaccessible jusqu'alors [84, 85]. Ainsi l'étude de l'échantillon de squelettes de Saint-Laurent de Grenoble datés entre le 13^{e} et 15^{e} siècles a permis de mettre en évidence un régime de mortalité dit de « catastrophe » très probablement dû aux grandes épidémies de pestes et à la guerre de cent ans qui sévissaient à cette période [86]. Cette spécificité de la fin du Moyen Âge n'était jusqu'alors pas détectable avec les variables archéologiques ou anthropologiques classiques.

En épidémiologie, l'estimation précise de l'âge au décès permet de prendre en compte le « paradoxe ostéologique » [87] en calculant les courbes de survies des échantillons selon des variables comme le sexe, le statut socio-économique, mais surtout selon la présence ou non de pathologie importante comme la tuberculose. Une étude récente des collections archéologiques du Nord de la France pour la période allant de l'Antiquité au Moyen Âge a permis de mettre en évidence les survies différentielles par sexe en défaveur des femmes dans de nombreux contextes, religieux et séculaires ou ruraux et urbains, confirmant les hypothèses d'un traitement inégal selon les sexes (accès aux soins, à la nourriture, surmortalité maternelle) [88, 89].

15.8 Conclusion

La cémentochronologie permet, à partir de l'analyse du cément dentaire d'un mammifère (animal ou humain), d'obtenir des informations d'ordre chronologique sur la vie d'un individu, principalement son âge et la période de l'année (saison) au moment de sa mort. Utilisée en archéologie, cette approche présente de nombreux intérêts pour les études paléodémographiques et pour les études de la saisonnalité et des modes d'occupation des sites. Son développement au cours de ces dernières années, grâce à l'informatisation de la microscopie notamment, en fait une technique de pointe très prometteuse. Néanmoins, un certain nombre d'aspects méthodologiques nécessitent encore d'être explorés, comme l'amélioration des procédures de préparation des spécimens archéologiques (caractère destructif), l'identification précise des altérations post-dépositionnelles et l'interprétation des structures histologiques chez une espèce donnée.

Bibliographie

[1] J. Castanet, F. J. Meunier, A. de Ricqlès, L'enregistrement de la croissance cyclique par le tissu osseux chez les vertébrés poïkilothermes : données comparatives et essai de synthèse, Bull. Biol. Fr. Belg. 111, 183–202, 1977.

[2] J. L. Baglinière, J. Castanet, F. Conand, F. J. Meunier, Terminologie en sclérochronologie chez les Vertébrés, in : J.-L. Baglinière, J. Castanet, F. Conand, F. J. Meunier (Eds.), Tissus Durs et Âge Individuel Des Vertébrés, ORSTOM-INRA, Paris, pp. 443–447, 1992.

[3] R. M. Laws, A New Method of Age Determination for Mammals, Nature. 169, 972–973, 1952.

[4] E. Sergent, Histoire d'un marais algérien, Institut Pasteur d'Algérie, Alger, 1947.

[5] E. H. McEwan, Seasonal annuli in the cementum of the teeth of barren ground caribou, Canadian Journal of Zoology. 4, 111–113, 1963.

[6] B. Mitchell, Growth layers in dental cement for determining the age of Red deer (Cervus elaphus L.), Journal of Animal Ecology. 36, 279–293, 1963.

[7] A. Saxon, C. Higham, A new research method for economic prehistorians, American Antiquity. 34, 303–311, 1969.

[8] B. C. Gordon, Of Men and Reindeer Herds in French Magdalenian Prehistory, BAR International Series 390, Oxford, 1988.

[9] A. Pike-tay, Variability and synchrony of seasonal indicators in dental cementum microstructure of the Kaminuriak caribou population, Archaeofauna. 4, 273–284, 1995.

[10] A. Pike-tay, L'analyse du cément dentaire chez les cerfs : l'application en Préhistoire, Paléo. 3, 149–166, 1991

[11] A. Burke, J. Castanet, Histological observations of cementum growth in horse teeth and their application to archaeology, Journal of Archaeological Science. 22, 479–493, 1995.

[12] D.E. Lieberman, R.H. Meadow, The biology of cementum increments (with an archaeological application), Mammal Review. 22, 57–77, 1992.

[13] A. J. Stutz, Polarizing Microscopy Identification of Chemical Diagenesis in Archaeological Cementum, Journal of Archaeological Science. 29, 1327–1347, 2002.

[14] W. Rendu, Hunting behavior and Neanderthal adaptability in the Late Pleistocene site of Pech-de-l'Aze I, Journal of Archaeological Science. 37, 1789–1810, 2010.

[15] L. Gourichon, Faune et saisonnalité. L'organisation temporelle des activités de subsistance dans l'Epipaléolithique et le Néolithique précéramique du Levant nord (Syrie), Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon 2, 2004.

[16] C. M. Wall, Z. R. Wall, Research design in digital luminance analysis, Journal of Archaeological Science. 33, 1152–1156, 2006.

[17] C. J. O'Brien, Determining Seasonality and Age in East African Archaeological Faunas : An Ethnoarchaeological Application of Cementum Increment Analysis., Ph.D., University of Wisconsin-Madison, 1994.

[18] T. R. Peck, Bison ethology and native settlement patterns during the Old Women's phase on the northwestern plains, BAR International Series 1278, Archaeopress, Oxford, 2004.

[19] A. R. Ten Cate, The development of the periodontium - a largely ectomesenchymally derived unit, Periodontol. 2000. 13, 9–19, 1997.

[20] S. J. Jones, Cement, in : J.W. Osborn (Ed.), Dental Anatomy and Embryology, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 193–205, 1981.

[21] H. H. Schroeder, The periodontium, Springer Verlag, Berlin, 1986.

[22] D. D. Bosshardt, H. H. Schroeder, Cementogenesis Reviewed : A comparison between human premolars and rodent molars, The Anatomical Record. 245, 267–292, 1996.

[23] S. J. Jones, A. Boyde, Coronal cementogenesis in the horse, Archives of Oral Biology. 19, 605–614, 1974.

[24] A. Burke, Applied Skeletochronology : The Horse as Human Prey During the Pleniglacial in Southwestern France, in : G.A. Clarke (Ed.), Archaeological Papers of the American Anthropological Association 4, pp. 145–150, 1993.

[25] B. L. Foster, K. J. Nagatomo, F. H. Nociti, H. Fong, D. Dunn, A. B. Tran, *et al.*, Central Role of Pyrophosphate in Acellular Cementum Formation, PLoS One. 7, 2012.

[26] K. A. Selvig, The fine structure of human cementum, Acta Odontol. Scand. 23, 423–441, 1965.

[27] E. d' Incau, Hypercémentose : définition, classification et fréquence. Apport des résultats à la lignée néandertalienne, Ph.D., Bordeaux 1, 2012.

[28] T. Yamamoto, T. Domon, S. Takahashi, M. N. Islam, R. Suzuki, The fibrillar structure of the cemento-dentinal junction in different kinds of human teeth, J. Periodont. Res. 36, 317–32, 20011.

[29] B. Knox, I. Aukhil, Ultrastructural study of experimental cementum regeneration in rats, Journal of Periodontal Research. 23, 60–67, 1988.

[30] W. Beertsen, T. Van den Bos, V. Everts, Continuous growth of acellular extrinsic fiber cementum : a review, Acta Med. Dent. Helv. 2, 103–115, 1997.

[31] P. Sequeira, D. D. Bosshardt, H. E. Schroeder, Growth of acellular extrinsic fiber cementum (AEFC) and density of inserting fibers in human premolars of adolescents, J. Periodont. Res. 27, 134–142, 1992.

[32] G. A. Klevezal, S. E. Kleinenberg, Age determination of mammals from annual layers in teeth and bones. Israel Program for Scientific Translations (Ed. orig. : Opredelenie Vozrasta mlekopitayushchikh po sloistym strukturam zubov i kosti. Moskva : Institut Morfologii Zhivotnykh im, A.N. Severtsova, Akademiya Nauk S.S.S.R.), 1969.

[33] P. A. Morris, A review of mammalian age determination methods, Mammal Review. 2, 69–104, 1972.

[34] C. A. Spinage, A review of the age determination of mammals by means of teeth, with special reference to Africa, East Africa Wildlife Journal. 11, 165–187, 1973.

[35] C. A. Spinage, Incremental cementum lines in the teeth of tropical African mammals, Journal of the Zoological Society of London. 178, 117–131, 1976.

[36] H. Grue, B. Jensen, Review of the Formation of Incremental Lines in Tooth Cementum of Terrestrial Mammals, Danish Review of Game Biology. 11, 1–48, 1979.

[37] S. Stallibrass, The use of cement layers for absolute ageing of mammalian teeth : a selective review of the literature, with suggestions for further studies and alternative applications, in : B. Wilson, C. Grigson, S. Payne (Eds.), Ageing and Sexing Animal Bones from Archaeological Sites, BAR International Series 109. Oxford, pp. 109–126, 1982

[38] M. Magitot, Treatise on Dental Caries, Cambridge Scholars Publishing, 1878.

[39] G. V. Black, A Study of the Histological Characters of the Periosteum and Peridental Membrane, W. T. Keener, 1887.

[40] I. N. Broomell, The histology of cementum, Dent Cosmos. 40, 697–723, 1898.

[41] R. Kronfeld, The biology of cementum, Journal of American Dental Association. 25, 1451–1461, 1938.

[42] B. Gottlieb, Continuous deposition of cementum, Journal of American Dental Association. 30, 842–847, 1943.

[43] H. A. Zander, B. Hürzeler, Continuous cementum apposition, Journal of Dental Research. 6, 1035–1044, 1958.

[44] G. G. Stott, R. F. Sis, B. M. Levy, Cemental Annulation as an Age Criterion in Forensic Dentistry, Journal of Dental Research. 61, 814–817, 1982.

[45] C. F. Miller, S. B. Dove, J. A. Cottone, Failure of use of cemental annulations in teeth to determine the age of humans, Journal of Forensic Sciences. 33, 137–143, 1988.

[46] K. Condon, D. K. Charles, J. M. Cheverud, J. E. Buikstra, Cementum annulation and age determination in Homo sapiens. II. Estimates and accuracy, American Journal of Physical Anthropology. 71, 321–30, 1986.

[47] P. Kagerer, G. Grupe, Age-at-death diagnosis and determination of life history parameters by incremental lines in human dental cementum as an identification aid, Forensic Science International. 118, 75–82, 2001.

[48] U. Wittwer-Backofen, J. Gampe, J. W. Vaupel, Tooth cementum annulation for age estimation : results from a large known-age validation study, American Journal of Physical Anthropology. 123, 119–29, 2004.

[49] J. Blondiaux, N. Gabart, A. Alduc-Le Bagousse, C. Niel, E. Tyler, Relevance of Cement Annulations to Paleopathology, Paleopathology Newsletter. 4–13, 2006.

[50] W. Rendu, Planification des activités de subsistance au sein du territoire des derniers Moustériens. Cémentochronologie et approche archéozoologique de gisements du Paléolithique moyen (Pech-de-l'Azé I, La Quina, Mauran) et Paléolithique supérieur ancien (Isturitz), Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 2007.

[51] D. E. Lieberman, The biological basis for seasonal increments in dental cementum and their application to archaeological research, Journal of Archaeological Science. 21, 525–539, 1994.

[52] J. Castanet, H. Francillon-vieillot, F. J. Meunier, A. Ricqlès, Bone and Individual Aging, in : B. K. Hall (Ed.), CRC Press, pp. 245–283, 1993.

[53] S. J. Jones, The root surface : an illustrated review of some scanning electron microscope studies, Scanning Microscopy. 1, 2003–2018, 1987.

[54] D. E. Lieberman, T. W. Deacon, R.H. Meadow, Computer Image Enhancement and Analysis of Cementum Increments as Applied to Teeth of Gazella gazella, Journal of Archaeological Science. 17, 519–533, 1990.

[55] M. J. Beasley, W. A. B. Brown, A. J. Legge, Incremental banding in dental cementum : methods of preparation for teeth from archaeological sites and for modern comparative specimens, International Journal of Osteoarchaeology. 2, 37–50, 1992.

[56] G. A. Klevezal, Recording Structures of Mammals : Determination of Age and Reconstruction of Life History, A. A. Balkema Series, Rotterdam, 1996.

[57] D. E. Lieberman, Life history variables preserved in dental cementum microstructure, Science. 261, 1162–1162, 1993.

[58] E. d' Incau, C. Couture, B. Maureille, Human tooth wear in the past and the present : tribological mechanisms, scoring systems, dental and skeletal compensations, Arch. Oral Biol. 57, 214–229, 2012.

[59] Y. Kaifu, K. Kasai, G. C. Townsend, L. C. Richards, Tooth Wear and the "Design" of the Human Dentition : A Perspective from Evolutionary Medicine, Yearbook of Physical Anthropology. 46, 47-61, 2003.

[60] H. Grue, Non-seasonal Incremental Lines in Tooth Cementum of Domestic Dogs (Canis familiaris L.), Danish Review of Game Biology. 10, 1–8, 1976.

[61] H. Grue, B. Jensen, Annual Cementum Structures in Canine Teeth in Arctic Foxes (Alopex lagopus) from Greenland and Denmark, Danish Review of Game Biology. 10, 1–12, 1976.

[62] B. Azaz, M. Ulmansky, R. Moshev, J. Sela, Correlation between age and thickness of cementum in impacted teeth, Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 38, 691–4, 1974.

[63] B. Azaz, Y. Michaeli, D. Nitzan, Aging of tissues of the roots of nonfunctional human teeth (impacted canines), Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. 43, 572–578, 1977.

[64] I. Stamfelj, G. Vidmar, E. Cvetko, D. Gaspersic, Cementum thickness in multirooted human molars : a histometric study by light microscopy, Ann. Anat. 190, 129–139, 2008.

[65] D. Walde, Bison breeding characteristics and interpretation of archaeological seasonality revisited, International Journal of Osteoarchaeology. 16, 481–492, 2006.

[66] D. R. McCullough, Failure of the tooth cementum aging technique with reduced population density of deer, Wildlife Society Bulletin. 24, 722–724, 1996.

[67] A. J. Stutz, Pursuing past seasons : a re-evaluation of cementum increment analysis in Paleolithic archaeology, University of Michigan, 2002.

[68] J.-L. Guadelli, J.-C. Ozouf, Etude expérimentales de l'action du gel sur les restes fauniques : premiers résultats, Artefacts, 9 : 47–56, 1994.

[69] A. M. Child, Towards and understanding of the microbial decomposition of archaeological bone in the burial environment, Journal of Archaeological Science. 22, 165–174, 1995.

[70] G. Geusa, L. Bondioli, E. Capucci, A. Cipriano, G. Grupe, C. Savorè, *et al.*, Dental cementum annulations and age at death estimates, in : L. Bondioli, R. Macchiarelli (Eds.), Osteodental Biology of the People of Portus Romae (Necropolis of Isola Sacra, 2nd-3rd Cent. AD), Roma, 1999.

[71] A. S. Gilbert, Microscopic bone structure in wild and domestic animals : a reappraisal, in : P.J. Crabtree, D. Campana, K. Ryan (Eds.), Early Animal Domestication and Its Cultural Context, The University Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia : M.A.S.C.A, pp. 47–86, 1989.

[72] A. J. Stutz, D. E. Lieberman, A. E. Spiess, Toward a reconstruction of subsistance economy in the upper Pleistocene Mosan Basin : Cementum increment evidence, in : M. Otte, L.G. Straus (Eds.), Le Trou Magrite, Fouille 1991-1992, Eraul, Liège, pp. 167–187, 1995.

[73] G. J. R. Maat, R. R. Gerretsen, M. J. Aarents, Improving the visibility of tooth cementum annulations by adjustment of the cutting angle of microscopic sections, Forensic Science International. 159, Supplemen, S95–S99, 2006.

[74] Z. Obertova, M. Francken, Tooth cementum annulation method : accuracy and applicability, Front Oral Biol. 13, 184–189, 2009.

[75] C. Azorit, J. Muñoz-Cobo, J. Hervás, M. Analla, Aging through growth marks in teeth of Spanish red deer, Wildlife Society Bulletin. 32, 702–710, 2004.

[76] G. A. Klevezal, N. I. Shishlina, Assessment of the Season of Death of Ancient Human from Cementum Annual Layers, Journal of Archaeological Science. 28, 481–486, 2001.

[77] V. L. Wedel, Determination of Season at Death Using Dental Cementum Increment Analysis, Journal of Forensic Sciences. 52, 1334–1337, 2007.

[78] M. Soressi, Le Moustérien de tradition acheuléenne du sud-ouest de la France. Discussion sur la signification du faciès à partir de l'étude comparée de quatre sites : Pech-de-l'Azé I, Le Moustier, La Rochette et la Grotte XVI, Université de Bordeaux I, 2002.

[79] D. Armand, É. Pubert, M. Soressi, Organisation saisonnière des comportements de prédation des Moustériens de Pech-de-l'Azé I. Premiers résultats, Paléo. 13, 19–28, 2001.

[80] W. Rendu, D. Armand, E. Pubert, M. Soressi, Approche taphonomique en cémentochronologie : réexamen du niveau 4 du Pech-de-l'Azé I (Carsac, Dordogne, France), Paléo. 21, 223-236, 2009.

[81] U. Wittwer-Backofen, J. Buckberry, A. Czarnetzki, S. Doppler, G. Grupe, G. Hotz, *et al.*, Basics in paleodemography : A comparison of age indicators applied to the early medieval skeletal sample of Lauchheim, American Journal of Physical Anthropology. 137, 384–396, 2008.

[82] M. Roksandic, D. Vlak, M.A. Schillaci, D. Voicu, Technical note : Applicability of tooth cementum annulation to an archaeological population, American Journal of Physical Anthropology. 140, 583–588, 2009.

[83] S. Naji, T. Colard, B. Bertrand, J.-P. Bocquet-Appel, J. Blondiaux, Cementochronology, to Cut or Not to Cut ? International Journal of Paleopathology. doi :10.1016/j.ijpp.2014.05.003, 2014.

[84] J.-P. Bocquet-Appel, La paléodémographie : 99,99 % de l'histoire démographique des hommes, éd.Errance, Paris, 2008.

[85] I. Séguy, L. Buchet, A. Bringé, Model life tables for pre-industrial populations. First applications in paleodemography, in : J.-P. Bocquet-Appel (Ed.), Recent Advances in Paleodemography. Data, Techniques, Patterns, Springer Verlag, Dordrecht, pp. 109–141, 2008.

[86] S. Naji, Analyse spatio-temporelle des données bioarchéologiques de la population médiévale de l'église Saint-Laurent de Grenoble, Isère : IVe – XVe siècle, Thèse de doctorat, EHESS, 2010.

[87] J. W. Wood, D. J. Holman, K. A. O'Connor, R. J. Ferrel, Mortality models for paleodemography, in : R. D. Hoppa, J. W. Vaupel (Eds.), Paleodemography : Age distribution from skeletal samples, Cambridge Studies in Biological and Evolutionary Anthropology 31, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 129–168, 2002.

[88] J. Blondiaux, S. Naji, T. Colard, J.-P. Bocquet-Appel, J. Buikstra, Cementochronology and Gender : A Reappraisal of Sex-Associated Differences in Survival in Past French Societies. International Journal of Paleopathology. En révision.

[89] J. Blondiaux, C. Niel, S. Naji, J.-P. Bocquet-Appel, T.Colard, The Leprosarium of Saint Thomas d'Aizier : The Cementochronological Proof of the Medieval Decline of Hansen Disease in Europe ? International Journal of Paleopathology. En révision.