



**HAL**  
open science

## Apports de l'analyse de la microarchitecture osseuse trabéculaire à l'étude des populations du passé

Antony Colombo

### ► To cite this version:

Antony Colombo. Apports de l'analyse de la microarchitecture osseuse trabéculaire à l'étude des populations du passé. Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, pp.16678, 2023, 978-2-7355-0927-0. <10.4000/books.cths.16678>. <hal-05054096>

**HAL Id: hal-05054096**

**<https://hal.science/hal-05054096v1>**

Submitted on 6 May 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Sous la direction de Hélène Coqueugniot, Olivier Dutour, Jacques Jaubert et Patrick Paillet

Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel

---

## Apports de l'analyse de la microarchitecture osseuse trabéculaire à l'étude des populations du passé

*Contributions of the Analysis of the Trabecular Bone Microarchitecture in the Populations of the Past*

**Antony Colombo**

---

Éditeur : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

Lieu d'édition : Paris

Publication sur OpenEdition Books : 17 mai 2023

Collection : Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques

ISBN numérique : 978-2-7355-0927-0



<https://books.openedition.org>

Fourni par Université Bordeaux Montaigne  
Univ Montaigne

### RÉFÉRENCE NUMÉRIQUE

Colombo, Antony. « Apports de l'analyse de la microarchitecture osseuse trabéculaire à l'étude des populations du passé ». *Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel*, édité par Hélène Coqueugniot et al., Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2023, <https://doi.org/10.4000/books.cths.16678>.

---

Ce document a été généré automatiquement le 2 mai 2025.

Le format PDF est diffusé sous Licence OpenEdition Books sauf mention contraire.

---

# Apports de l'analyse de la microarchitecture osseuse trabéculaire à l'étude des populations du passé

*Contributions of the Analysis of the Trabecular Bone Microarchitecture in the Populations of the Past*

**Antony Colombo**

---

*L'auteur remercie ici les co-auteurs des travaux présentés : H. Coqueugniot, O. Dutour, A. Waters-Rist, M. Hoogland, J.-J. Hublin, M. G. Belcastro, M. Bettuzzi, M.-P. Morigi, Z. Tsegai, N. Stephens ; ainsi que la région Nouvelle-Aquitaine, la fondation Fyssen, l'université de Bologne, l'Institut Max Planck d'anthropologie évolutionniste, pour leur contribution financière et technique.*

- 1 À chaque développement des techniques d'imagerie médicale, l'anthropologie biologique s'est adaptée aux innovations de son temps. En novembre 1895, Wilhelm Röntgen a découvert les rayons X et a publié sa découverte en janvier 1896<sup>1</sup>. Deux mois plus tard, Walter König a été le premier à radiographier une momie et à faire entrer l'imagerie médicale dans notre discipline. En 1970, Allan Cormack a transposé à l'imagerie médicale le théorème de projection de Radon, et Godfrey Hounsfield a construit le premier scanner médical : la tomодensitométrie assistée par ordinateur (TDM ou CT) était née. En 1971, les premières images TDM de cerveau ont été obtenues ; en 1976, le cerveau d'un tisserand égyptien (3200 av. J.-C.) a été scanné. En 1982, les premières images micro-tomodensitométriques ( $\mu$ TDM ou  $\mu$ CT) ont été publiées<sup>2</sup>. Or, pour obtenir des images de qualité, la dose d'irradiation est trop élevée pour analyser des sujets humains vivants. Il faudra attendre les années 2000 pour que l'utilisation de la  $\mu$ TDM augmente de manière exponentielle en recherche biomédicale. Quelques années supplémentaires seront nécessaires pour que l'anthropologie biologique s'en empare à son tour.

- 2 Le microscanner fonctionne sur le même principe que les scanners médicaux. Le type « industriel » est privilégié pour l'analyse des ossements humains, comme en témoigne son installation dans des laboratoires français de recherche en anthropologie biologique (pour les laboratoires du LaScArBx, hébergé dans l'UMS 3626 PLACAMAT, université de Bordeaux ; plateforme AST-RX de l'UMS 2700 2AD, Muséum national d'histoire naturelle, MNHN).
- 3 La TDM présente plusieurs avantages pour l'anthropologie biologique<sup>3</sup>. Tout en étant non invasive, elle autorise un accès aux structures internes et à la morphologie 3D des spécimens scannés. Elle permet aussi une préservation des spécimens originaux en reportant les manipulations sur les modèles 3D et leur large diffusion. La TDM autorise également la modélisation des espaces vides, offrant des informations jusqu'alors inaccessibles.
- 4 La  $\mu$ TDM offre les mêmes avantages, avec l'atout supplémentaire de fournir des détails équivalents à ceux proposés par la microscopie en histologie<sup>4</sup>. Malgré la dose d'irradiations émises, la  $\mu$ TDM est non destructive pour l'ADN<sup>5</sup>. Cette technique est donc particulièrement adaptée à l'étude des populations du passé.
- 5 L'os humain est l'objet d'étude de prédilection des bioanthropologues. La  $\mu$ TDM permet d'avoir accès à son organisation microscopique : sa microarchitecture. La biologie propose plusieurs échelles d'analyse, de l'organisme à la cellule. L'étude de la microarchitecture se situe au niveau tissulaire et consiste en l'analyse des caractéristiques et de l'organisation des unités élémentaires du tissu osseux (ostéons pour l'os cortical, trabécules pour l'os trabéculaire) et de leurs facteurs d'influence. Ses premières observations ont posé les bases de la biomécanique osseuse. En 1867, l'orientation des trabécules est mise en relation avec des lignes de contraintes. Julius Wolff, en 1892, montre que celles-ci se modifient si les contraintes changent. Wilhelm Roux en propose le mécanisme cellulaire que John C. Koch confirme en 1917 en définissant un rapport optimisé de la résistance de la structure et de la masse osseuse<sup>6</sup>.
- 6 Les sciences biomédicales s'intéressent principalement à la microarchitecture osseuse trabéculaire (MAOT) et analysent les propriétés mécaniques de l'os pour mieux comprendre et prévenir la sénescence, plus particulièrement l'ostéoporose et son risque fracturaire, afin de proposer et de tester des traitements<sup>7</sup>.
- 7 La paléontologie et l'anthropologie biologique s'y intéressent aussi, plus modestement. Quelques références montrent l'utilité de la MAOT à des fins d'identification spécifique<sup>8</sup>. Cependant, l'adaptation fonctionnelle de l'os trabéculaire est la problématique principale<sup>9</sup> en anthropologie, notamment dans le cadre des registres locomoteurs<sup>10</sup>. Enfin, même si l'ontogénie dans l'espèce humaine est une question qui suscite beaucoup d'intérêt, elle ne commence à être abordée en anthropologie biologique et paléanthropologie du point de vue de la MAOT que depuis quelques années<sup>11</sup>. En effet, son étude peut permettre de comprendre le développement d'un individu, les processus de croissance et leurs facteurs d'influence, particulièrement pour le développement locomoteur. L'analyse de la MAOT peut également apporter des éclairages nouveaux en termes de processus pathologiques, en cherchant à identifier les signes précoces de diverses maladies ou à en détailler l'état pathologique.
- 8 Nous présentons ici plusieurs travaux pour illustrer l'intérêt des analyses microarchitecturales du développement normal, avec l'analyse de l'acquisition de la

bipédie d'abord, puis du développement pathologique, avec l'analyse d'un cas de nanisme génétique et d'un cas de rachitisme.

## Développement normal complexe de la MAOT et marqueurs de transitions locomotrices chez l'enfant

- 9 La MAOT connaît des changements ontogéniques très différents d'une région anatomique à une autre, que ce soit entre deux éléments osseux ou à l'intérieur d'un même os<sup>12</sup>. Malgré cela, d'une manière générale, la région la plus proche du cartilage de croissance présente un ratio volumique important (le pourcentage que représente l'os trabéculaire dans le volume total analysé) s'expliquant par des trabécules fines et peu espacées, plus nombreuses que dans les régions plus éloignées, à l'organisation plus spécifique aux contraintes. Il a été montré qu'en s'éloignant du cartilage de croissance, l'ensemble des trabécules, formées par minéralisation du modèle cartilagineux, n'est pas conservé ; la plupart sont résorbées par les chondroclastes ou les ostéoclastes<sup>13</sup>. Les éléments restants augmentent en épaisseur jusqu'à quadrupler par un dépôt de matrice osseuse non minéralisée à l'intérieur de la métaphyse.
- 10 Il faut aussi composer avec des rythmes de croissance, qui ne sont pas les mêmes tout au long du développement. Par exemple, l'os trabéculaire iliaque fœtal présente un taux d'accroissement 240 fois supérieur à celui d'un enfant<sup>14</sup>. En fonction de la localisation osseuse étudiée, les changements de la MAOT au sein d'un même os pourraient être spécifiques de la période de développement analysée<sup>15</sup>. Les caractéristiques de la MAOT semblent beaucoup changer pendant les premières années de l'enfance, avec un remodelage peu actif. Par la suite, seule l'épaisseur trabéculaire est modifiée avec la croissance, mais le remodelage modifie la plupart des variables. Enfin pendant l'adolescence, la MAOT n'évolue plus avec l'âge, seul le remodelage concerne le ratio volumique et le nombre des trabécules<sup>16</sup>. Entre os comparables des membres supérieurs et inférieurs, la MAOT varie considérablement en fonction de l'âge. Fémurs et humérus de fœtus ne montrent aucune différence<sup>17</sup>, alors que radius et tibias ont des caractéristiques très différentes chez l'enfant et l'adolescent<sup>18</sup>.
- 11 L'adolescence est une période importante pour les variations de la MAOT. En effet, avant elle, il n'y a aucune différence significative de la MAOT entre les sexes. À activité et taux de calcium identiques<sup>19</sup>, pour les membres supérieurs<sup>20</sup> ou inférieurs<sup>21</sup> les variations sexuelles de la MAOT n'apparaissent qu'à la puberté. En outre, des changements plus importants pour les sujets masculins ont été corrélés à une augmentation du taux de testostérone, régulant en partie le développement de la structure trabéculaire<sup>22</sup>.
- 12 Le tissu osseux modifie sa structure pour optimiser sa résistance aux contraintes imposées<sup>23</sup>. Ces remaniements permettent d'analyser et d'extraire des signaux de comportements locomoteurs, mais aussi de comprendre leur impact sur le développement osseux en général<sup>24</sup>.
- 13 Aucune différence microarchitecturale n'est relevée entre les membres supérieurs et inférieurs d'un fœtus dont les os sont soumis aux mêmes contraintes biomécaniques dans l'utérus<sup>25</sup>. La forte adaptabilité de l'os aux contraintes biomécaniques et son taux de remodelage très élevé à ces âges<sup>26</sup>, associés aux changements locomoteurs au cours des premières années de vie, entraînent des adaptations morphologiques des os des

membres inférieurs<sup>27</sup>. Au contraire, le membre supérieur devient libre de contraintes locomotrices et se spécialise dans l'utilisation de la main<sup>28</sup>.

- 14 Les rythmes du développement de la marche bipède autonome chez l'enfant sont variables et dépendent fortement du contexte socioculturel. Ainsi, toutes populations confondues, en contexte de développement normal, un enfant est capable de marcher seul entre 9 et 18 mois<sup>29</sup>. L'apprentissage de la marche est un processus complexe qui est conditionné biologiquement et culturellement, dépendant aussi de la maturation du système nerveux central<sup>30</sup>. Cette étape du développement est un événement social dont l'acquisition précoce entraîne les débuts de l'individualisation<sup>31</sup>. Les interactions et échanges affectifs avec la mère et l'entourage<sup>32</sup>, l'encouragement à marcher<sup>33</sup> et l'apprentissage fourni<sup>34</sup>, indépendamment du statut nutritionnel<sup>35</sup>, sont des facteurs importants de cette variabilité. L'acquisition de la bipédie se divise en plusieurs étapes successives constituant une séquence présente en tout ou partie chez tous les enfants<sup>36</sup>. Au cours de cette séquence, une redistribution des charges pondérales au niveau des articulations s'effectue, les enfants développent des stratégies alternatives de déplacement et n'auront une démarche efficace de type adulte qu'après l'âge de 6 ans<sup>37</sup>.
- 15 Même si les étapes de l'acquisition de la marche et les facteurs l'influençant sont bien connus aujourd'hui, les variations de la MAOT pendant cette période le sont nettement moins. Seules trois études préliminaires s'y sont intéressées et ont analysé des localisations anatomiques et des paramètres microarchitecturaux différents. La première a montré qu'avec le perfectionnement de la marche bipède, l'os trabéculaire de l'enfant devient plus orienté et moins variable d'une région à une autre analysée du tibia<sup>38</sup>. La deuxième a montré, au niveau de l'extrémité distale du radius, que pendant la phase de locomotion quadrupède, l'os trabéculaire se renforçait et se restructurait pour faire face aux nouvelles contraintes locomotrices<sup>39</sup>. Enfin, la troisième a montré la correspondance des différentes phases de modifications du pas avec les variations de la MAOT de trois différentes régions du calcaneus<sup>40</sup>.

## Développement pathologique de la MAOT

### Aide au diagnostic : un cas de nanisme génétique

- 16 La  $\mu$ TDM est utilisée en paléopathologie depuis une douzaine d'années pour une approche essentiellement qualitative de la structure osseuse utile au diagnostic étiologique et préférable à l'histologie pour des éléments osseux crâniens<sup>41</sup> ou postcrâniens<sup>42</sup>. Les seules études s'appuyant sur des données quantitatives ont proposé un diagnostic de tuberculose<sup>43</sup> et de nanisme génétique<sup>44</sup>. Pour cette dernière, l'approche développée a permis, par une analyse multivariée de variables microarchitecturales 3D, de poser un diagnostic positif.
- 17 Pour résumer, le nanisme *s.l.* correspond à un déficit statural dont les causes sont multiples : origine génétique (liée à des mutations, délétions, translocations) dans les cas d'ostéochondrodysplasies, origine tumorale lors d'un déficit hormonal dans le cas d'un nanisme primordial, origine métabolique dans le cas d'un rachitisme sévère. Le nanisme génétique est le plus fréquent ; l'achondroplasie se caractérise par une micromélie (raccourcissement des membres) et des dysmorphies craniofaciales (modifications morphologiques et macrocéphalie) principalement. La mutation d'un

gène codant pour le facteur de croissance FGFR3 en est responsable<sup>45</sup>, altérant la différenciation des chondrocytes et les conduisant à l'apoptose<sup>46</sup>.

- 18 En contexte archéologique, depuis la Préhistoire et à travers le monde, le nanisme est assez peu fréquent (34 cas)<sup>47</sup> et avec une espérance de vie normale ; seuls 3 enfants ont été identifiés.
- 19 Dans le cimetière rural de Middenbeemster (Pays-Bas), chaque personne inhumée de 1829 à 1866 a été identifiée précisément<sup>48</sup>. Une femme naine décédée en 1863 et sa descendance y ont été exhumées. Si la mère présentait des caractéristiques d'achondroplasie, aucun de ses trois enfants, aux crânes très fragmentés, décédés en période périnatale, n'en montrait de signe. Alors que 20 % des enfants atteints ne sont pas reconnus achondroplasies à la naissance<sup>49</sup>, et avec 50 % de risque de transmission, il était fort probable qu'au moins l'un des trois partage cette affection. L'absence de signe macroscopique ou radiographique de nanisme génétique ne constitue pas une preuve de développement normal. La MAOT étant un sous-produit du cartilage de croissance, l'hypothèse a été posée que le dysfonctionnement du cartilage entraînerait des défauts structurels de la MAOT reconnaissables dès les premiers instants du développement osseux.
- 20 La MAOT de ces trois sujets périnatals<sup>50</sup> a été analysée dans l'objectif de définir si elle pouvait être utile au diagnostic d'un nanisme génétique. Les métaphyses proximales des humérus de ces 3 sujets et de 2 sujets au développement normal et d'âge similaire ont été acquises par  $\mu$ TDM (7 à 12  $\mu$ m) et 6 paramètres microarchitecturaux ont été intégrés dans une analyse multivariée. Cette analyse a alors montré que 2 des 3 sujets périnatales de Middenbeemster avaient une MAOT à l'organisation quantitativement différente. Ces résultats remis dans leur contexte, vu les antécédents médicaux maternels, suggèrent qu'un diagnostic de nanisme génétique pouvait être proposé. Par ailleurs, des variations directement reliées au dysfonctionnement du cartilage de croissance ont été mises en évidence au niveau de la MAOT pour l'achondroplasie<sup>51</sup>.

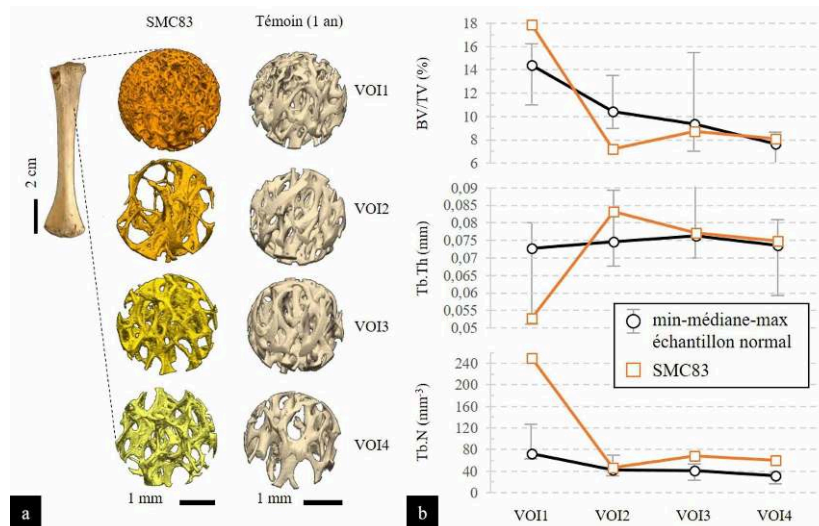
## Détailler et affiner les processus pathologiques : un cas de rachitisme

- 21 Le rachitisme est une maladie métabolique majoritairement d'origine carencielle en vitamine D. La vitamine D a un rôle dans la régulation des taux de calcium et phosphore. Dérivée du cholestérol, elle est produite dans la peau sous l'effet des rayonnements ultraviolets du soleil, mais peut aussi être apportée par l'alimentation. La diminution du taux de vitamine D entraîne une diminution de l'absorption intestinale du calcium ; la minéralisation du tissu ostéoïde se fait mal, des défauts de croissance se mettent en place, avec à terme une déminéralisation du squelette et des déformations osseuses<sup>52</sup>.
- 22 Les déformations en courbure des os longs avec des angulations anormales des articulations et les gonflements métaphysaires sont facilement reconnaissables et caractéristiques des changements squelettiques liés au rachitisme, sans être pathognomoniques. D'autres, moins spécifiques, peuvent être identifiées dans la région du thorax et du bassin. Radiologiquement, une clarté métaphysaire, un amincissement de l'os cortical et un os trabéculaire désorganisé sont associés. Au début d'un rachitisme actif, seul un effilochage de surfaces métaphysaires évasées peut être

identifié. Avec la guérison, une néoformation osseuse poreuse et spiculée peut être vue. Un épaissement de l'os cortical peut être noté une fois la guérison terminée<sup>53</sup>.

- 23 Le rachitisme dans une population archéologique peut être un marqueur social et environnemental de ses conditions de vie. En dépit de rares exemples identifiés au Paléolithique, la grande majorité des cas a été mise en lien avec la sédentarisation et l'urbanisation dès le Néolithique et plus tardivement, avec l'industrialisation dans certaines régions (accès à la nourriture et exposition au soleil contraintes<sup>54</sup>).
- 24 Nous présentons ici les résultats d'un travail inédit sur un sujet rachitique médiéval (sujet SMC83, âgé d'entre 0,6 et 1,7 an, nécropole de l'église Saint-Martin à Cognac, Charente, VII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècle<sup>55</sup>). Cet enfant a été diagnostiqué rachitique puisqu'il présentait une incurvation antéro-postérieure bilatérale prononcée des os longs, une inclinaison accentuée des plateaux tibiaux, des métaphyses gonflées et une porosité corticale crânienne accrue. Par ailleurs, d'autres individus de la population étaient rachitiques ou montraient des marqueurs de stress biologique non spécifique associés (ligne de Harris, hypoplasie de l'émail dentaire, *cribra orbitalia*, etc.).
- 25 La MAOT de SMC83 a été comparée à celle de 4 enfants d'âge connu et similaire (collection de référence du MNHN). Les métaphyses osseuses humérales ont été acquises par  $\mu$ TDM (10 à 14  $\mu$ m). 4 zones strictement comparables ont été étudiées (volumes d'intérêt, VOI) le long de l'axe principal de l'os, selon un protocole précis<sup>56</sup>. 3 paramètres mesurés nous intéressent ici : BV / TV (ratio volumique d'os trabéculaire dans le VOI), Tb.Th (l'épaisseur des trabécules), Tb.N (le nombre de trabécules dans le VOI). Il est important de noter que le VOI le plus proche de la surface métaphysaire contient l'os trabéculaire le plus récemment formé. Au contraire, le plus éloigné contient le tissu osseux le plus ancien, le plus remodelé et le plus adapté aux contraintes.
- 26 Qualitativement (fig. 1A) et quantitativement (fig. 1B), les VOI1 et VOI2 révélaient une structure complètement différente chez le sujet rachitique. Ainsi, les VOI3 et VOI4 de SMC83 présentent un ratio volumique dans la variabilité de l'échantillon de comparaison, une épaisseur trabéculaire similaire à la médiane de l'échantillon et un nombre de trabécules légèrement supérieur à la variabilité. VOI2 montre un ratio volumique inférieur à la variabilité, une épaisseur trabéculaire proche des valeurs maximales de l'échantillon et un nombre de trabécules similaire à celui de la médiane de l'échantillon. Enfin, VOI1 présente un ratio volumique nettement supérieur à la variabilité, une épaisseur trabéculaire proche des valeurs minimales de l'échantillon et un nombre de trabécules nettement supérieur.

Fig. 1. – Analyse microarchitecturale d'un cas de rachitisme médiéval (sujet SMC83, église Saint-Martin, Cognac, Charente).



**a** : comparaison qualitative de quatre zones métaphysaires du sujet SMC83 rachitique et d'un sujet témoin sain d'âge comparable. **b** : analyse quantitative de la microarchitecture trabéculaire du sujet SMC83 comparée à un échantillon d'enfants sains (VOI : volume d'intérêt ; BV/TV : ratio volumique osseux ; Tb.Th : épaisseur trabéculaire ; Tb.N : nombre de trabécules).

© Antony Colombo.

- 27 La clarté métaphysaire, signe radiologique associé, se traduit par une diminution du ratio volumique, et / ou des trabécules moins nombreuses et / ou épaisses.
- 28 Une étude clinique sur 3 enfants atteints d'un rachitisme carenciel actif a montré une diminution importante du ratio volumique en lien avec une augmentation de la résorption osseuse<sup>57</sup>. SMC83, même si ses valeurs de BV / TV entrent dans la variabilité normale pour les deux derniers VOIs, présente une décroissance importante du ratio volumique pour VOI2. D'après ces données et nos observations, les mesures de VOI1 ne rendent compte ni d'une structure normale ni d'une structure de rachitisme actif. Ainsi, SMC83 aurait pu être en cours de guérison au moment de sa mort. La valeur d'épaisseur trabéculaire de VOI2, nettement supérieure à la variation normale, en désaccord avec une résorption osseuse importante et un rachitisme actif, s'expliquerait alors. La MAOT de VOI2, visiblement dégradée, ses trabécules les plus fines ont donc été résorbées. Les plus épaisses auraient alors été renforcées au moment de la guérison avec le retour de la minéralisation. Ce qui peut être compris comme une adaptation par remodelage du tissu osseux aux contraintes biomécaniques. Les caractéristiques de VOI1 marqueraient la reprise des processus de croissance, avec une production massive de fines trabécules présentant des valeurs similaires aux valeurs fœtales. Dans l'hypothèse d'un rachitisme en cours de guérison, le rachitisme aurait donc été actif lorsque VOI2 était en lieu et place de VOI1.

## Conclusions

- 29 À travers ces exemples, nous nous sommes attaché à montrer l'intérêt des analyses microarchitecturales pour aborder les processus de développement et les processus pathologiques.

- 30 Les processus de croissance, lorsqu'ils sont (au moins en partie) influencés par des contraintes environnementales biomécaniques, peuvent être abordés et interprétés grâce aux traces reconnaissables dans la MAOT. Identifier les étapes du développement psychomoteur des enfants grâce à l'analyse de leur MAOT peut permettre de comprendre les rythmes de croissance et de les interpréter en termes socioculturels. Plus généralement, toute activité qui aura une influence biomécanique sur le tissu osseux peut potentiellement être identifiée, du moment que sont analysées les localisations anatomiques adéquates. Ces marqueurs microarchitecturaux sont un atout majeur dans l'analyse des populations anciennes, notamment en matière d'activités.
- 31 Les processus pathologiques ont un impact sur la MAOT. Le nanisme génétique et le rachitisme carenciel n'en sont que deux exemples. L'avantage majeur d'analyses dans ce contexte est de pouvoir proposer des diagnostics de maladie pour des cas douteux et d'affiner la compréhension du processus pathologique en détaillant l'état d'avancement au moment du décès. Plus généralement, la MAOT peut permettre de mieux détecter certaines affections dans les populations archéologiques et d'obtenir des données paléoépidémiologiques peut-être plus fiables ou, du moins, plus proches de la réalité.
- 32 Ainsi, l'analyse de la MAOT, champ d'étude bioanthropologique récent, tend à faire ses preuves dans la compréhension des facteurs biologiques, environnementaux et culturels qui influencent les populations du passé.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Adolph K., Karasik L., Tamis-Lemonda C., 2009, « Motor skills », dans Bornstein M. (dir.), *Handbook of Cultural Developmental Science*, New York, Taylor and Francis Press, p. 61-88.
- Angulo-Barroso R., Schapiro L., Liang W., Rodrigues O., Shafir T., Kaciroti N., Jacobson S., Lozoff B., 2011, « Motor Development in 9-Month-Old Infants in Relation to Cultural Differences and Iron Status », *Developmental Psychobiology*, vol. 53, n° 2, p. 196-210.
- Barbe V. et Tournette C., 1999, « Tous les enfants présentent-ils le même profil de développement psychomoteur dans la petite enfance ? », *Journal de pédiatrie et de puériculture*, vol. 12, n° 1, p. 35-49.
- Beresheim A., Pfeiffer S., Grynypas M., 2020, « Ontogenetic Changes to Bone Microstructure in an Archaeologically Derived Sample of Human Ribs », *Journal of Anatomy*, vol. 236, n° 3, p. 448-462.
- Brickley M. et Ives R., 2008, *The Bioarchaeology of Metabolic Bone Disease*, Oxford, Elsevier Academic Press.
- Chappard D., Baslé M.-F., Legrand E., Audran M., 2008, « Trabecular Bone Microarchitecture: A Review », *Morphologie*, vol. 92, n° 299, p. 162-170.
- Clearfield M., 2011, « Learning to Walk Changes Infants' Social Interactions », *Infant Behavior and Development*, vol. 34, n° 1, p. 15-25.

- Colombo A., 2014, « La MAOT de l'os en croissance : variabilité tridimensionnelle normale et pathologique analysée par microtomodensitométrie », thèse de doctorat en anthropologie biologique, Talence, université de Bordeaux.
- Colombo A., Hoogland M., Coqueugniot H., Dutour O., Waters-Rist A., 2018, « Trabecular Bone Microarchitecture Analysis: a Way for an Early Detection of Genetic Dwarfism? Case Study of a Dwarf Mother's Offspring », *International Journal of Paleopathology*, vol. 20, n° 1, p. 65-71.
- Colombo A., Stephens N., Tsegai Z., Bettuzzi M., Morigi M. P., Belcastro M. G., Hublin J.-J., 2019, « Trabecular Analysis of the Distal Radial Metaphysis during the Acquisition of Crawling and Bipedal Walking: a Preliminary Study », *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, vol. 31, n° 1-2, p. 43-51.
- Coqueugniot H., Desbarats P., Dutailly B., Panuel M., Dutour O., 2010, « Les outils de l'imagerie médicale et de la 3D au service des maladies du passé », dans Vergnien R. et Delevoie C. (dir.), *Virtual Retrospect 2009*, Pessac, Ausonius éditions (Archéovision, 4), p. 177-180.
- Coqueugniot H., Dutailly B., Desbarats P., Boulestin B., Pap I., Szikossy I., Baker O., Montaudon M., Panuel M., Karlinger K., Kovács B., Kristóf L., Pálfi G., Dutour O., 2015, « Three-Dimensional Imaging of Past Skeletal TB: from Lesion to Process ». *Tuberculosis*, vol. 95, suppl. 1, p. S73-S79.
- Delezoide A., Benoist-Lasselien C., Legeai-Mallet L., Le Merrer M., Munnich A., Vekemans M., Bonaventure J., 1998, « Spatio-Temporal Expression Of FGFR 1, 2 and 3 Genes during Human Embryo-Fetal Ossification », *Mechanisms of Development*, vol. 77, n° 1, p. 19-30.
- Elliott J. et Dover S., 1982, « X-Ray Microtomography », *Journal of Microscopy*, vol. 126, n° 2, p. 211-213.
- Fajardo R., Ryan T., Kappelman J., 2002, « Assessing the Accuracy of High-Resolution X-Ray Computed Tomography of Primate Trabecular Bone by Comparisons with Histological Sections », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 118, n° 1, p. 1-10.
- Fazzalari N., Moore A., Byers S., Byard R., 1997, « Quantitative Analysis of Trabecular Morphogenesis in the Human Costochondral Junction during the Postnatal Period in Normal Subjects », *Anatomical Record*, vol. 248, n° 1, p. 1-12.
- Frost H., 1990, « Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU). 2. Redefining Wolff's Law: the Remodeling Problem », *Anatomical Record*, vol. 226, n° 4, p. 414-422.
- He M., Walle E., Campos J., 2015, « A Cross-National Investigation of the Relationship between Infant Walking and Language Development », *Infancy*, vol. 20, n° 3, p. 283-305.
- Horton W., Hall J., Hecht J., 2007, « Achondroplasia », *Lancet*, vol. 370, n° 9582, p. 162-172.
- Immel A., Le Cabec A., Bonazzi M., Herbig A., Temming H., Hublin J.-J., Tafforeau P., Krause J., 2016, « Effect of X-Ray Irradiation on Ancient DNA in Sub-Fossil Bones: Guidelines for Safe X-Ray Imaging », *Scientific Reports*, vol. 6, article n° 32969.
- Kirmani S., Christen D., Van Lenthe G., Fischer P., Bouxsein M., McCready L., Melton L., Riggs B., Amin S., Müller R., 2009, « Bone Structure at the Distal Radius during Adolescent Growth », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 24, n° 6, p. 1033-1042.
- Kivell T., 2016, « A Review of Trabecular Bone Functional Adaptation: what Have We Learned from Trabecular Analyses in Extant Hominoids and what Can We Apply to Fossils? », *Journal of Anatomy*, vol. 228, n° 4, p. 569-594.

- Kuhn G., Schultz M., Müller R., Rühli F., 2007, « Diagnostic Value Of Micro-CT in Comparison with Histology in the Qualitative Assessment of Historical Human Postcranial Bone Pathologies », *HOMO, Journal of Comparative Human Biology*, vol. 58, n° 2, p. 97-115.
- Liu D., Burrows M., Egeli D., McKay H., 2010, « Site Specificity of Bone Architecture between the Distal Radius and Distal Tibia in Children and Adolescents: an HR-pQCT Study », *Calcified Tissue International*, vol. 87, n° 4, p. 314-323.
- Marie P. J., Pettifor J. M., Ross F. P., Glorieux F. H., 1982, « Histological Osteomalacia Due to Dietary Calcium Deficiency in Children », *New England Journal of Medicine*, vol. 307, p. 584-588.
- Mazurier A., Nakatsukasa M., Macchiarelli R., 2010, « The Inner Structural Variation of the Primate Tibial Plateau Characterized by High-Resolution Microtomography: Implications for the Reconstruction of Fossil Locomotor Behaviours », *Comptes rendus Palevol*, vol. 9, n° 6-7, p. 349-359.
- Modlesky C., Bajaj D., Kirby J., Mulrooney B., Rowe D., Miller F., 2011, « Sex Differences in Trabecular Bone Microarchitecture Are not Detected in Pre and Early Pubertal Children Using Magnetic Resonance Imaging », *Bone*, vol. 49, p. 1067-1072.
- Raichlen D., Gordon A., Foster A., Webber J., Sukhdeo S., Scott R., Gosman J., Ryan T., 2015, « An Ontogenetic Framework Linking Locomotion and Trabecular Bone Architecture with Applications for Reconstructing Hominin Life History », *Journal of Human Evolution*, vol. 81, avril, p. 1-12.
- Reissis D. et Abel R., 2012, « Development of Fetal Trabecular Microarchitecture in the Humerus and Femur », *Journal of Anatomy*, vol. 220, n° 5, p. 496-503.
- Rittemard C., 2019, « Identification d'espèce par micro-CT et reconstruction tridimensionnelle : méthodologie et applications aux sciences archéologiques, historiques et forensiques », thèse de doctorat en anthropologie biologique, Paris, École pratique des hautes études, université Paris sciences et lettres.
- Röntgen W.-C., 1896, « On a New Kind of Rays », *Science*, vol. 3, n° 59, p. 227-231.
- Rousseau F., Bonaventure J., Legeai-Mallet L., Pelet A., Rozet J.-M., Maroteaux P., Le Merrer M., Munnich A., 1994, « Mutations in the Gene Encoding Fibroblast Growth Factor Receptor-3 in Achondroplasia », *Nature*, vol. 371, n° 6494, p. 252-254.
- Rühli F., Kuhn G., Evison R., Müller R., Schultz M., 2007, « Diagnostic Value of Micro-CT in Comparison with Histology in the Qualitative Assessment of Historical Human Skull Bone Pathologies », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 133, n° 4, p. 1099-1111.
- Ryan T. et Ketcham R., 2005, « Angular Orientation of Trabecular Bone in the Femoral Head and its Relationship to Hip Joint Loads in Leaping Primates », *Journal of Morphology*, vol. 265, n° 3, p. 249-263.
- Ryan T. et Krovitiz G., 2006, « Trabecular Bone Ontogeny in the Human Proximal Femur », *Journal of Human Evolution*, vol. 51, n° 6, p. 591-602.
- Ryan T. et Shaw C., 2012, « Unique Suites of Trabecular Bone Features Characterize Locomotor Behavior in Human and Non-Human Anthropoid Primates », *PLoS ONE*, vol. 7, n° 7, e41037.
- Ryan T., Raichlen D., Gosman J., 2017, « Structural and Mechanical Changes in Trabecular Bone during Early Development in the Human Femur and Humerus », dans Percival C. et Richtsmeier J. (dir.), *Building Bones: Bone Formation and Development in Anthropology*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 281-302.

- Saers J., Ryan T., Stock J., 2020, « Baby Steps towards Linking Calcaneal Trabecular Bone Ontogeny and the Development of Bipedal Human Gait », *Journal of Anatomy*, vol. 236, n° 3, p. 474-492.
- Salle B., Rauch F., Travers R., Bouvier R., Glorieux F., 2002, « Human Fetal Bone Development: Histomorphometric Evaluation of the Proximal Femoral Metaphysis », *Bone*, vol. 30, p. 823-828.
- Shaw C. et Ryan T., 2012, « Does Skeletal Anatomy Reflect Adaptation To Locomotor Patterns? Cortical And Trabecular Architecture in Human and Nonhuman Anthropoids », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 147, n° 2, p. 187-200.
- Stephens N., Kivell T., Gross T., Pahr D., Lazenby R., Hublin J.-J., Hershkovitz I., Skinner M., 2016, « Trabecular Architecture in the Thumb of Pan and Homo: Implications for Investigating Hand Use, Loading, and Hand Preference in the Fossil Record », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 161, n° 4, p. 603-619.
- Sylla M., Sidibé T., Traoré B., Traoré I., Dicko-Traoré F., Keita M., 2007, « Développement psychomoteur des nourrissons de 0 à 12 mois dans le district de Bamako », *Journal de pédiatrie et de puériculture*, vol. 20, n° 6, p. 233-237.
- Tardieu C., 1999, « Ontogeny and Phylogeny of Femoro-Tibial Characters in Humans and Hominid Fossils: Functional Influence and Genetic Determinism », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 110, n° 3, p. 365-377.
- Wang Q., Wang X., Iuliano-Burns S., Ghasem-Zadeh A., Zebaze R., Seeman E., 2010, « Rapid Growth Produces Transient Cortical Weakness: A Risk Factor for Metaphyseal Fractures during Puberty », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 25, n° 7, p. 1521-1526.
- Waters-Rist A. et Hoogland M., 2013, « Osteological Evidence of Short-Limbed Dwarfism in a Nineteenth Century Dutch Family: Achondroplasia or Hypochondroplasia », *International Journal of Paleopathology*, vol. 3, n° 4, p. 243-256.

## NOTES DE BAS DE PAGE

1. Röntgen 1896.
2. Elliot et Dover 1982.
3. Coqueugniot *et al.* 2010.
4. Fajardo *et al.* 2002.
5. Immel *et al.* 2016.
6. Chappard *et al.* 2008.
7. *Ibid.*
8. Rittemard 2019.
9. Kivell 2016.
10. Ryan et Ketcham 2005 ; Ryan et Shaw 2012.
11. Beresheim *et al.* 2019 ; Colombo 2014 ; Colombo *et al.* 2019 ; Ryan et Krovitz 2006 ; Raichlen *et al.* 2015 ; Ryan *et al.* 2017 ; Saers *et al.* 2020.
12. Ryan *et al.* 2017.

13. Fazzalari *et al.* 1997.
14. Salle *et al.* 2002.
15. Colombo 2014, p. 204 ; Ryan *et al.* 2017.
16. Colombo 2014, p. 201-203.
17. Reissis et Abel 2012.
18. Liu *et al.* 2010.
19. Modlesky *et al.* 2011.
20. Kirmani *et al.* 2009.
21. Wang *et al.* 2010.
22. Kirmani *et al.* 2009.
23. Frost 1990.
24. Mazurier *et al.* 2010 ; Ryan et Ketcham 2005 ; Ryan et Shaw 2012 ; Shaw et Ryan 2012.
25. Reissis et Abel 2012.
26. Salle *et al.* 2002.
27. Frost 1990 ; Tardieu 1999.
28. Stephens *et al.* 2016.
29. Adolph *et al.* 2009.
30. He *et al.* 2015.
31. Sylla *et al.* 2007.
32. Clearfield 2011.
33. Barbe et Tourrette 1999.
34. Sylla *et al.* 2007.
35. Angulo-Barroso *et al.* 2011.
36. Adolph *et al.* 2009.
37. *Ibid.*
38. Raichlen *et al.* 2015.
39. Colombo *et al.* 2019.
40. Saers *et al.* 2020.
41. Rühli *et al.* 2007.
42. Kuhn *et al.* 2007.
43. Coqueugniot *et al.* 2015.
44. Colombo *et al.* 2018.
45. Rousseau *et al.* 1994.
46. Delezoide *et al.* 1998.
47. Colombo 2014, p. 118-120.
48. Waters-Rist et Hoogland 2013.
49. Horton *et al.* 2007.
50. Colombo *et al.* 2018.
51. Fazzalari *et al.* 1997.

52. Brickley et Ives 2008, p. 75-77.

53. *Ibid.*, p. 97-101.

54. *Ibid.*, p. 94-96.

55. Colombo 2014, p. 224-228.

56. *Ibid.*, p. 132-140.

57. Marie *et al.* 1982.

## RÉSUMÉS

Chaque nouvelle innovation d'imagerie médicale a été exploitée pour les sciences anthropologiques. Depuis le début des années 2000, la microtomodensitométrie permet d'aller de plus en plus loin dans l'investigation non invasive des tissus osseux, trabéculaires notamment. Elle fournit un niveau de détail comparable aux images histologiques tout en permettant des analyses tridimensionnelles. Ainsi la microarchitecture osseuse trabéculaire, extrêmement sensible aux contraintes biomécaniques ou pathologiques, présente un fort potentiel pour identifier des changements comportementaux, mais aussi pour mieux comprendre les processus pathologiques ou pour les identifier plus précocement. La démonstration de l'intérêt des analyses microarchitecturales pour l'étude des populations du passé se fera à travers plusieurs exemples : du développement locomoteur des enfants à l'analyse de plusieurs conditions pathologiques.

Each medical imaging innovation has been exploited for the anthropological sciences. Since the early 2000s, microcomputed tomography allows to go further in the non-invasive investigation of bone tissue, especially the trabecular one. It provides a level of detail comparable to histological images while allowing three-dimensional analyses. Thus, trabecular bone microarchitecture, which is extremely sensitive to biomechanical or pathological constraints, has great potential for identifying behavioural changes, but also for a better understanding of pathological processes or for detecting them at an earlier stage. The interest of microarchitectural analyses for the study of populations of the past will be demonstrated through several examples: from the locomotor development of children to the analysis of several pathological conditions.

## INDEX

**Mots-clés :** microarchitecture, os trabéculaire, développement, maladie osseuse, comportement locomoteur

**Keywords :** microarchitecture, trabecular bone, development, bone disease, locomotor behaviour

## AUTEUR

Antony Colombo

Laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie (PACEA, UMR 5199, université de Bordeaux / CNRS) ; École pratique des hautes études, université Paris sciences et lettres