



HAL
open science

À qui est cet os ? Différenciation os humain-os animal par reconstruction 3D du réseau canalaire cortical

Charlotte Ritemard, Olivier Dutour, Hélène Coqueugniot

► To cite this version:

Charlotte Ritemard, Olivier Dutour, Hélène Coqueugniot. À qui est cet os ? Différenciation os humain-os animal par reconstruction 3D du réseau canalaire cortical. H. Coqueugniot; O. Dutour; J. Jaubert; P. Paillet. Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2023, 10.4000/books.cths.16913 . hal-04330192

HAL Id: hal-04330192

<https://hal.science/hal-04330192>

Submitted on 7 Dec 2023

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.



Hélène Coqueugniot, Olivier Dutour, Jacques Jaubert et Patrick Paillet (dir.)

Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

À qui est cet os ? Différenciation os humain-os animal par reconstruction 3D du réseau canalaire cortical

Whose Bone Is it? Differentiation between Human and Animal Bone by 3D Reconstruction of the Cortical Canal Network

Charlotte Rittemard, Olivier Dutour et Hélène Coqueugniot

DOI : 10.4000/books.cths.16913

Éditeur : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

Lieu d'édition : Paris

Année d'édition : 2023

Date de mise en ligne : 17 mai 2023

Collection : Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques

EAN électronique : 9782735509270



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

RITTEMARD, Charlotte ; DUTOUR, Olivier ; et COQUEUGNIOT, Hélène. *À qui est cet os ? Différenciation os humain-os animal par reconstruction 3D du réseau canalaire cortical* In : *Les sciences archéologiques à l'ère du virtuel* [en ligne]. Paris : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2023 (généré le 08 septembre 2023). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/cths/16913>>. ISBN : 9782735509270. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.cths.16913>.

Ce document a été généré automatiquement le 8 septembre 2023.

À qui est cet os ? Différenciation os humain-os animal par reconstruction 3D du réseau canalaire cortical

Whose Bone Is it? Differentiation between Human and Animal Bone by 3D Reconstruction of the Cortical Canal Network

Charlotte Ritemard, Olivier Dutour et Hélène Coqueugniot

- 1 La distinction entre des restes humains et animaux ou entre différentes espèces fauniques peut s'avérer déterminante pour l'étude d'ensembles squelettiques et l'interprétation de sites archéologiques. Cependant, en cas de forte fragmentation, la méthode d'identification macromorphologique atteint ses limites et l'utilisation de nouveaux critères d'identification et d'une méthode d'analyse plus précise est alors nécessaire. Dans cette perspective, l'analyse de la microstructure osseuse et en particulier du réseau canalaire cortical apparaît particulièrement intéressante. En effet, ce réseau présente des différences de structure en fonction des espèces¹. Cet article vise à définir des paramètres microstructuraux du réseau canalaire cortical permettant de discriminer l'origine humaine ou animale de fragments osseux ou de les attribuer à leur espèce animale d'appartenance. Nous présentons ici les premiers résultats d'une nouvelle méthode d'identification d'espèce reposant sur l'analyse tridimensionnelle du réseau canalaire cortical, appliquée à la comparaison d'ossements humains, de bœuf et de porc.

État de l'art

- 2 En réponse à une forte fragmentation des restes osseux et en l'absence d'éléments anatomiques distinctifs, plusieurs techniques d'identification d'espèces ont été développées. Les analyses génétiques et biomoléculaires ont notamment prouvé leur

efficacité². Néanmoins, ces techniques ne sont pas toujours applicables, en fonction du degré de dégradation des molécules biologiques et de l'ancienneté des ossements³. Au contraire, les paramètres microstructuraux de l'os cortical résistent mieux au temps et peuvent conserver leur organisation, même soumis à de fortes températures⁴. Ces caractères apparaissent alors particulièrement intéressants en contexte archéologique. Par ailleurs, les travaux menés en histologie ont démontré le potentiel des analyses qualitatives et quantitatives de la microstructure osseuse, et plus particulièrement de l'os cortical, pour la distinction d'espèces⁵. L'agencement du tissu osseux cortical varie, en effet, selon les espèces observées⁶. Par exemple, l'organisation plexiforme de la corticale ou la structuration en bandes d'ostéons, correspondant à la présence de plusieurs ostéons organisés en rangs, ont longtemps été considérées comme caractéristiques des grands mammifères à croissance rapide⁷ et ne se retrouvent que rarement chez l'Homme, dans le cas de sujets immatures. Toutefois, des études récentes menées chez l'Homme adulte montrent que ce dernier caractère n'est pas distinctif à lui seul⁸, mettant en avant le besoin de nouveaux critères de distinction. Les paramètres quantitatifs des ostéons et canaux de Havers permettent également de différencier des restes humains et animaux⁹. On note notamment des diamètres des canaux plus fins et un nombre de connexions entre canaux plus important chez l'animal¹⁰.

- 3 Cependant, le caractère destructif de l'histologie est un réel désavantage, en particulier en contexte archéologique. En outre, les mesures effectuées en histologie reposent sur l'observation de coupes en deux dimensions (2D). Or l'os s'organise en trois dimensions (3D) dans l'espace, et les observations en 2D peuvent être biaisées en fonction de l'angle et de la localisation de la coupe analysée¹¹.
- 4 C'est pourquoi l'analyse microtomographique (μ CT) de la microstructure canalaire de l'os cortical semble être une alternative intéressante. La microtomographie est une technique d'imagerie à rayons X basée sur l'obtention de séries de coupes radiographiques permettant l'accès aux structures internes des ossements en recréant un modèle virtuel 3D. Depuis une vingtaine d'années, la μ CT fait partie des outils de référence pour l'analyse de la microstructure osseuse trabéculaire et, plus récemment, corticale¹². Cette technique offre de nouvelles perspectives grâce à deux avantages majeurs. Premièrement, il s'agit d'une technique non destructive, préservant les échantillons osseux¹³ et donc particulièrement adaptée aux restes fragiles et rares. Deuxièmement, la μ CT permet d'effectuer des reconstructions en 3D et des analyses volumétriques du tissu osseux¹⁴. L'approche volumique apporte de nouveaux critères d'analyse pour l'observation et la quantification de la microstructure osseuse corticale. Par ailleurs, le rayonnement synchrotron (SR) produit une grande qualité d'image et autorise l'accès à de très hautes résolutions, nécessaires à l'observation de structures de taille très réduite, comme les canaux corticaux chez les rongeurs ou les ostéocytes de l'os cortical¹⁵.

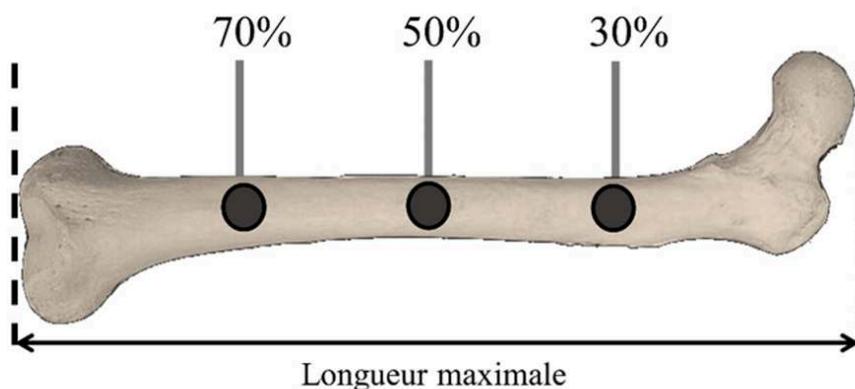
Matériel

- 5 Notre échantillon se compose de trois espèces : l'Homme (*Homo sapiens*), le porc (*Sus scrofa*) et le bœuf (*Bos taurus*). Notre corpus humain comprend les fémurs de 8 hommes et 9 femmes. Les spécimens humains ont été sélectionnés au sein de la collection ostéologique issue du site archéologique de la Granède (fouilles Saint-Pierre, 2010 et

2013) et conservée à l'ostéothèque de Pessac¹⁶. L'ensemble des individus étudiés correspond à des adultes, dont l'âge au décès est estimé entre 19 et 59 ans et ne présentant aucun signe pathologique. Les espèces animales ont été sélectionnées en fonction de leur présence récurrente en contexte archéologique, notamment en association à des vestiges humains¹⁷. L'échantillon faunique comprend 13 fémurs et 11 humérus de porc (*Sus scrofa*) ainsi que 9 fémurs et 4 humérus de bœuf (*Bos taurus*), appartenant à des sujets adultes ou de taille adulte.

- 6 Nos analyses se sont concentrées sur les diaphyses d'os longs, pièces particulièrement difficiles à attribuer à une espèce donnée lorsqu'elles sont fragmentées¹⁸. De plus, le fémur et l'humérus possèdent une corticale épaisse permettant l'accès à un nombre de structures (canaux corticaux) suffisant pour nos analyses. En outre, il s'agit d'ossements largement documentés dans la littérature, notamment pour l'identification de taxons¹⁹.
- 7 Nous avons analysé trois volumes d'intérêt, définis à 30 %, 50 % et 70 % de la longueur totale de l'os (fig. 1). Les zones reconstruites mesurent 500 coupes en hauteur, soit 1,225 mm et 1 000 coupes en largeur et profondeur, soit 2,45 mm.

Fig. 1. – Positionnement des volumes d'intérêt étudiés à 30 %, 50 % et 70 % de la longueur maximale de l'os.



© Charlotte Rittemard.

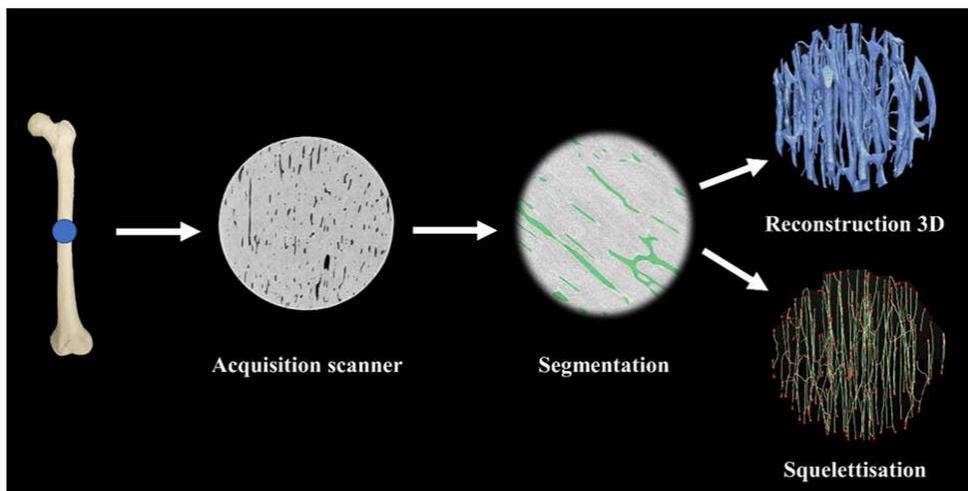
Méthode

- 8 L'ensemble des spécimens a été scanné sur la ligne PSICHÉ du synchrotron SOLEIL²⁰ (Saclay, France) à une résolution spatiale de 2,45 μm . Les images obtenues ont ensuite été segmentées afin d'extraire le réseau canalaire cortical du volume osseux, puis reconstruites en 3D (fig. 2). Cette étape a été effectuée grâce au logiciel TIVMI® (*Treatment and Increased Vision for Medical Imaging*) en utilisant l'algorithme HMH 3D, implémenté dans le logiciel²¹. Les reconstructions ont servi de base pour l'analyse

qualitative du réseau canalaire cortical nous permettant de préciser l'organisation générale du réseau canalaire via deux critères :

- l'attribution à un type d'os observé, basé sur l'organisation de la vascularisation corticale précédemment établie²² (tabl. 1) ;
- l'observation d'une organisation et une répartition des canaux uniformes ou hétérogènes sur l'ensemble du volume.

Fig. 2. – Étapes du protocole de traitement et d'analyse des scans μ CT.



© Charlotte Ritemard.

Tableau 1. – Classification des types d'os en fonction de l'organisation des canaux, utilisée dans notre étude.

I. TISSUS OSSEUX AVASCULAIRES : NE CONTENANT AUCUN CANAL VASCULAIRE
II. TISSUS OSSEUX VASCULAIRES PRIMAIRES
Orientation unique :
Canaux longitudinaux
Canaux circulaires
Canaux radiaires
Canaux obliques
Orientations multiples :
Tissu osseux laminaire (canaux circonférentiels et longitudinaux)
Tissu osseux plexiforme (canaux circonférentiels, longitudinaux et radiaux)
Tissu osseux réticulaire (réseau irrégulier et désorganisé)
Tissu osseux radial (canaux longitudinaux et radiaux)
III. TISSUS OSSEUX VASCULAIRES À CANAUX SECONDAIRES / OS HAVERSIEN
Os haversien dense (réseau compact ne laissant que peu ou pas d'espace interstitiel)
Os haversien irrégulier (quelques ostéons isolés et / ou dispersés au sein du tissu osseux)

Os haversien endostéal (ostéons uniquement présents aux abords de la surface endostéale)
--

D'après Riquès 1975, Francillon-Vieillot *et al.* 1990 et Brits *et al.* 2014.

- 9 Nous avons ensuite appliqué à nos segmentations un algorithme de squelettisation par amincissement homotopique²³. La technique de squelettisation permet de transformer des données volumiques (groupes de voxels) en éléments topologiques mesurables entre segments et nœuds et donne accès aux variables métriques du réseau, présentées dans le tableau 2. Sur la base de ces paramètres qualitatifs et quantitatifs, nous avons effectué des comparaisons entre les trois espèces de notre corpus afin de tester la possibilité de déterminer l'espèce d'appartenance d'un ossement à partir d'un fragment osseux, grâce à un test par arbre de décision et forêt aléatoire²⁴. La méthode de classification par arbre de décision consiste à réaliser un partitionnement récursif des individus en sous-groupes sous la forme d'un arbre. Chaque division correspond à l'interrogation de plusieurs variables dont le résultat indique la branche à suivre en fonction de la variance résiduelle restant dans les branches descendantes afin d'obtenir des classes les plus « pures » possibles. Ce processus est répété 5 000 fois et l'ensemble des arbres de classification obtenu forme ce que l'on appelle une « forêt aléatoire ».

Tableau 2. – Paramètres de l'analyse microstructurale 3D de l'os cortical.

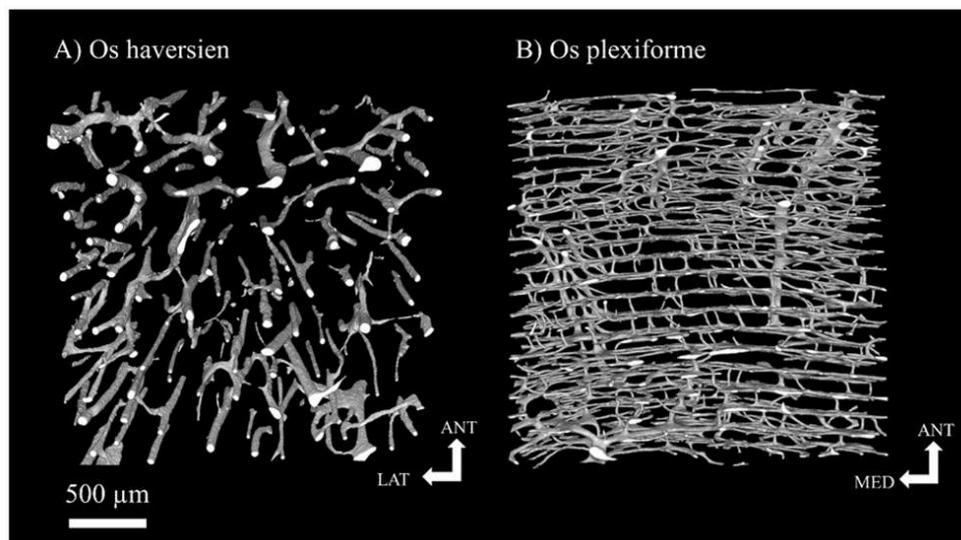
PARAMÈTRE	ABRÉVIATION	UNITÉ
Porosité corticale (volume des canaux corticaux rapporté au volume total)	Ca.V / TV	%
Nombre de canaux	Ca.N	mm ⁻³
Diamètre des canaux	Ca.D	µm
Longueur des canaux	Ca.Le	µm
Connectivité (densité de connexions)	Ca.ConnD	mm ⁻³
Orientation des canaux (par rapport aux 3 axes directionnels de scan et calculée par produit scalaire)	Ca.Or	degré

- 10 Les abréviations ont été définies selon la nomenclature présentée par Parfitt *et al.* 1987 et Dempster *et al.* 2013.

Résultats

- 11 Nos résultats concordent avec les études précédentes de la microstructure corticale de différentes espèces²⁵. Nous observons une distinction claire entre l'échantillon humain et les espèces animales. Les ossements humains présentent tous un os haversien dense, réparti de façon uniforme sur l'ensemble du volume analysé (fig. 3). Au contraire, nous notons la présence majoritaire d'os primaire plexiforme chez *Bos taurus* et *Sus scrofa*. Nous remarquons également la présence d'os réticulaire, radial, ainsi que des canaux longitudinaux chez les espèces animales. Sur la base de l'organisation des canaux, il est donc possible de faire la distinction entre des spécimens humains et animaux. Cependant, les espèces animales présentent des organisations vasculaires très similaires. Ces observations confirment les résultats obtenus précédemment²⁶.

Fig. 3. – Types d'os majoritairement rencontrés dans notre échantillon.

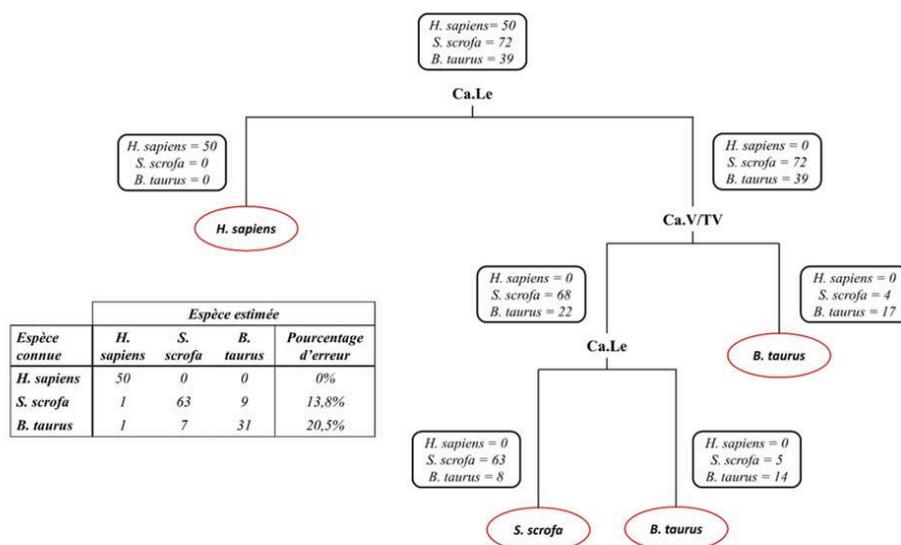


A : os haversien dense. **B** : os plexiforme.

© Charlotte Ritemard.

- 12 Ces observations sont, de plus, corroborées par les analyses métriques. Le réseau canalaire d'*Homo sapiens* comprend moins de canaux et de connexions que celui de *Bos taurus* et de *Sus scrofa*, et ces canaux présentent un diamètre plus large. Les divergences entre les espèces animales sont moins marquées ; toutefois, nous notons que les corticales de *Sus scrofa* possèdent un nombre de canaux et de connexions en moyenne plus important que celles de *Bos taurus*.
- 13 Par ailleurs, le test par forêt aléatoire effectué sur notre échantillon permet une identification d'espèce avec 88,82 % de réussite. Tous les individus humains sont correctement identifiés, contre 86,2 % des individus de l'espèce *Sus scrofa* et 79,51 % de *Bos taurus*. Le test permet également de déterminer les variables les plus discriminantes. La longueur moyenne des canaux (Ca.Le) et la connectivité (Ca.ConnD) apparaissent comme les paramètres les plus discriminants. Elles portent les poids les plus importants dans l'analyse et interviennent notamment au moment de la division entre *Homo sapiens* et les autres espèces animales (fig. 4).

Fig. 4. – Arbre de décision répartissant progressivement les spécimens dans les groupes d'espèces estimées (ovales) et tableau récapitulatif des résultats de la forêt aléatoire.



© Charlotte Rittemard.

Discussion et conclusion

- 14 Notre méthode apparaît comme une alternative non invasive à l'histologie, appropriée en cas de spécimens rares ou fragiles. L'observation et la quantification du réseau canalaire cortical en 3D constitue une méthode prometteuse d'analyse discriminante interspécifique. Cette méthode s'applique avec profit dans le domaine des sciences archéologiques, en cas de forte fragmentation osseuse et devant l'échec des méthodes classiques d'identification macromorphologique. Notre étude confirme que l'approche qualitative n'est pas suffisante pour l'identification des restes osseux fragmentés. Les deux espèces animales choisies (*Sus scrofa* et *Bos taurus*) sont proches l'une de l'autre, notamment en termes de rapidité de croissance osseuse et de mode de locomotion²⁷. En conséquence, leur microstructure osseuse corticale montre une organisation similaire. L'approche quantitative semble plus intéressante. Ce travail préliminaire montre l'efficacité d'une telle approche dans la discrimination Homme-animal de fragments osseux ainsi qu'entre espèces animales. Dans notre corpus, *Homo sapiens* est intégralement séparé des espèces animales avec un taux d'identification de 100 %, et nous avons obtenu un taux de bonne détermination, proche de 80 %, pour les espèces animales. Nos résultats présentent un meilleur taux d'identification que ceux des études précédentes pour ce qui concerne la distinction de *Sus scrofa*. Notre taux d'identification est en effet de 86,2 % alors qu'il est, pour d'autres auteurs, de 42,67 %²⁸ et de 75 %²⁹. Notre approche apparaît donc comme prometteuse pour aller plus loin dans l'identification d'espèces animales, y compris celles qui présentent de grandes similitudes d'organisation osseuse comme *Bos taurus* et *Sus scrofa*.
- 15 Par ailleurs, l'analyse par forêt aléatoire, qui permet de diviser notre échantillon par espèces en fonction des données métriques du réseau canalaire cortical, peut être

utilisée en sens inverse. Il est, en effet, possible de comparer un échantillon donné à un corpus de référence afin de déterminer son groupe d'appartenance.

- 16 Enfin, nous avons pu identifier les paramètres microstructuraux les plus discriminants pour l'identification d'espèce : la longueur moyenne des canaux (Ca.Le) et la connectivité (Ca.ConnD). Cela démontre l'importance de l'analyse en 3D du réseau canalaire cortical, car il s'agit de critères particulièrement soumis aux biais liés à l'approche 2D.
- 17 En conclusion, cette étude préliminaire nous permet de confirmer le grand potentiel de l'analyse microtomographique avec reconstruction tridimensionnelle de l'os humain et animal, actuel et ancien. Elle ouvre des perspectives pour l'interprétation des ensembles et gisements archéologiques en contribuant à l'identification directe de restes squelettiques ou de mobilier réalisés à partir d'ossements. Cette identification participe à la compréhension des relations entre l'Homme et son environnement, en donnant un aperçu des moyens de subsistance des populations du passé ainsi que de certains aspects de leur culture et de leurs productions matérielles.
- 18 Afin de confirmer et d'améliorer ces premiers résultats, il est toutefois nécessaire de développer cette méthode sur d'autres éléments osseux, en élargissant notamment le spectre des espèces animales testées.

BIBLIOGRAPHIE

- Andronowski J. M., Pratt I. V., Cooper D. M. L., 2017, « Occurrence of Osteon Banding in Adult Human Cortical Bone », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 164, n° 3, p. 635-642.
- Basillais A., Bensamoun S., Chappard C., Brunet-Imbault B., Lemineur G., Ilharreborde B., Ho Ba Tho M.-C., Benhamou C.-L., 2007, « Three-Dimensional Characterization of Cortical Bone Microstructure by Microcomputed Tomography: Validation with Ultrasonic and Microscopic Measurements », *Journal of Orthopaedic Science*, vol. 12, n° 2, p. 141-148.
- Bellis C., Ashton K. J., Freney L., Blair B., Griffiths L. R., 2003, « A Molecular Genetic Approach for Forensic Animal Species Identification », *Forensic Science International*, vol. 134, n° 2, p. 99-108.
- Bernardini F., Tuniz C., Zanini F., 2019, « X-Ray Computed Microtomography for Paleoanthropology, Archaeology, and Cultural Heritage », dans Lazzara G. (dir.), *Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation and Restoration of Cultural Heritage*, Amsterdam, Elsevier, p. 25-45.
- Bloch I., 2017, « Fuzzy Skeleton and Skeleton by Influence Zones: A Review », dans Saha P. K., Borgerfors G., Sanniti di Baja G. (dir.), *Skeletonization: Theory, Methods and Applications*, Elsevier / Academic Press, p. 71-87.
- Bousson V., Peyrin F., Bergot C., Hausard M., Sautet A., Laredo J. D., 2004, « Cortical Bone in the Human Femoral Neck: Three-Dimensional Appearance and Porosity Using Synchrotron Radiation », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 19, n° 5, p. 794-801.

- Bouxsein M. L., Boyd S. K., Christiansen B. A., Guldberg R. E., Jepsen K. J., Müller R., 2010, « Guidelines for Assessment of Bone Microstructure in Rodents Using Micro-Computed Tomography », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 25, n° 7, p. 1468-1486.
- Brandt E., Wiechmann I., Grupe G., 2002, « How Reliable are Immunological Tools for the Detection of Ancient Proteins in Fossil Bones? », *International Journal of Osteoarchaeology*, vol. 12, n° 5, p. 307-316.
- Brits D., Steyn M., L'Abbé E. N., 2014, « A Histomorphological Analysis of Human and Non-Human Femora », *International Journal of Legal Medicine*, vol. 128, p. 369-377.
- Britz H. M., Jokihaara J., Leppanen O. V., Jarvinen T., Cooper D. M., 2010, « 3D Visualization and Quantification of Rat Cortical Bone Porosity Using a Desktop Micro-CT System: A Case Study in the Tibia », *Journal of Microscopy*, vol. 240, n° 1, p. 32-37.
- Buckley M., Collins M., Thomas-Oates J., Wilson J. C., 2009, « Species Identification by Analysis of Bone Collagen Using Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionisation Time-of-Flight Mass Spectrometry », *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, vol. 23, n° 23, p. 3843-3854.
- Cattaneo C., Porta D., Gibelli D., Gamba C., 2009, « Histological Determination of the Human Origin of Bone Fragments », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 54, p. 531-533.
- Chappard C., Bensalah S., Olivier C., Gouttenoire P. J., Marchadier A., Benhamou C., Peyrin F., 2013, « 3D Characterization of Pores in the Cortical Bone of Human Femur in the Elderly at Different Locations as Determined by Synchrotron Micro-Computed Tomography Images », *Osteoporosis International*, vol. 24, n° 3, p. 1023-1033.
- Cooper D. M. L., Turinsky A. L., Sensen C. W., Hallgrímsson B., 2003, « Quantitative 3D Analysis of the Canal Network in Cortical Bone by Micro-Computed Tomography », *The Anatomical Record*, part B : *The New Anatomist*, vol. 274B, n° 1, p. 169-179.
- Cooper D. M. L., Thomas C. D. L., Clement J. G., Hallgrímsson B., 2006, « Three-Dimensional Microcomputed Tomography Imaging of Basic Multicellular Unit-Related Resorption Spaces in Human Cortical Bone », *The Anatomical Record*, part A : *Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, vol. 288A, n° 7, p. 806-816.
- Cooper D. M. L., Turinsky A. L., Sensen C. W., Hallgrímsson B., 2007, « Effect of Voxel Size on 3D Micro-CT Analysis of Cortical Bone Porosity », *Calcified Tissue International*, vol. 80, n° 3, p. 211-219.
- Cooper D. M. L., Thomas C. D. L., Clement J. G., 2011, « Technological Developments in the Analysis of Cortical Bone Histology », dans Crowder C. et Stout S. (dir.), *Bone Histology: an Anthropological Perspective*, CRC Press, p. 361-375.
- Crawley M. J., 2012, *The R Book*, John Wiley & Sons, 943 p.
- Crescimanno A. et Stout S. D., 2012, « Differentiating Fragmented Human and Nonhuman Long Bone Using Osteon Circularity », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 57, n° 2, p. 287-294.
- Cuijpers A. G. F. M., 2006, « Histological Identification of Bone Fragments in Archaeology: Telling Humans Apart from Horses and Cattle », *International Journal of Osteoarchaeology*, vol. 16, p. 465-480.
- Cuijpers S. et Lauwerier R. C. G. M., 2008, « Differentiating between Bone Fragments from Horses and Cattle: A Histological Identification Method for Archaeology », *Environmental Archaeology*, vol. 13, n° 2, p. 165-179.

- Cummaudo M., Cappella A., Biraghi M., Raffone C., Márquez-Grant N., Cattaneo C., 2018, « Histomorphological Analysis of the Variability of the Human Skeleton: Forensic Implications », *International Journal of Legal Medicine*, vol. 132, n° 5, p. 1493-1503.
- Dempster D. W., Compston J. E., Drezner M. K., Glorieux F. H., Kanis J. A., Malluche H., Meunier P. J., Ott S. M., Recker R. R., Parfitt A. M., 2013, « Standardized Nomenclature, Symbols and Units for Bone Histomorphometry: A 2012 Update of the Report of the ASBMR Histomorphometry Nomenclature Committee », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 28, p. 2-17.
- Dominguez V. M. et Crowder C. M., 2012, « The Utility of Osteon Shape and Circularity for Differentiating Human and Non-Human Haversian Bone », *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 149, n° 1, p. 84-91.
- Dutailly B., Coqueugniot H., Desbarats P., Gueorguieva S., Synave R., 2009, « 3D Surface Reconstruction Using HMH Algorithm », dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, actes de colloque (16, Le Caire, 7-10 novembre 2009), IEEE, p. 2505-2508.
- Faraway J. J., 2016, *Extending the Linear Model with R: Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models*, Boca Raton, CRC Press, 332 p.
- Francillon-Vieillot H., Buffrénil (de) V., Castanet J., Géraudie J., Meunier F. J., Sire J. Y., Zylberberg L., Ricqlès (de) A., 1990, « Microstructure and Mineralization of Vertebrate Skeletal Tissues », dans Saha P. K., Borgerfors G., Sanniti di Baja G. (dir.), *Skeletonization: Theory, Methods and Applications*, Elsevier / Academic Press, p. 175-234.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., 2009, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2^e éd., New York, Springer.
- Hillier M. L. et Bell L. S., 2007, Differentiating Human Bone from Animal Bone: a Review of Histological Methods », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 52, p. 249-263.
- King A., Guignot N., Zerbino P., Boulard E., Desjardins K., Bordessoule M., Leclercq N., Lê S., Renaud G., Cerato M., Bornert M., Lenoir N., Delzon S., Perrillat J.-P., Le Godec Y., Itié J.-P., 2016, « Tomography and Imaging at the PISCHE Beamline of the SOLEIL Synchrotron », *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, 093704.
- Maggiano I. S., Maggiano C. M., Clement J. G., Thomas C. D. L., Carter Y., Cooper D. M. L., 2016, « Three-Dimensional Deconstruction of Haversian Systems in Human Cortical Bone Using Synchrotron Radiation-Based Micro-CT: Morphology and Quantification of Branching and Transverse Connections across Age », *Journal of Anatomy*, vol. 228, p. 719-732.
- Martiniaková M., Grosskopf B., Omelka R., Vondráková M., Bauerová M., 2006, « Differences Among Species in Compact Bone Tissue Microstructure of Mammalian Skeleton: Use of a Discriminant Function Analysis for Species Identification », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 51, n° 6, p. 1235-1239.
- Martiniaková M., Grosskopf B., Omelka R., Dammers K., Vondráková M., Bauerová M., 2007, « Histological Study of Compact Bone Tissue in some Mammals: a Method for Species Determination », *International Journal of Osteoarchaeology*, vol. 17, p. 82-90.
- Morales J.-P., Roa I., Zavando D., Galdames I. S. 2012, « Determination of the Species from Skeletal Remains Through Histomorphometric Evaluation and Discriminant Analysis », *International Journal of Morphology*, vol. 30, n° 3, p. 1035-1041.
- Mulhern D. M. et Ubelaker D. H., 2001, « Differences in Osteon Banding between Human and Nonhuman Bone », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 46, n° 2, p. 220-222.

- Mulhern D. M. et Ubelaker D. H., 2011, « Differentiating Human from Nonhuman Bone Microstructure », dans Crowder C. et Stout S. (dir.), *Bone Histology: An Anthropological Perspective*, Boca Raton, CRC Press, p. 109-134.
- Parfitt A. M., Drezner M. K., Glorieux F. H., Kanis J. A., Malluche H., Meunier P. J., Ott S. M., Recker R. R., 1987, « Bone Histomorphometry: Standardization of Nomenclature, Symbols, and Units », *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 2, n° 3, p. 595- 610.
- Particelli F., Mecozzi L., Beraudi A., Montesi M., Baruffaldi F. Viceconti M., 2012, « A Comparison between Micro-CT and Histology for the Evaluation of Cortical Bone: Effect of Polymethylmethacrylate Embedding on Structural Parameters », *Journal of Microscopy*, vol. 245, n° 3, p. 302-310.
- Peter Z.-A. et Peyrin F., 2011, « Synchrotron Radiation Micro-CT Imaging of Bone Tissue: Theory and Applications of CT Imaging and Analysis », dans Homma N. (dir.), *Theory and Applications of CT Imaging and Analysis*, InTech, p. 233-254.
- Pokines J. T., 2015, « Identification of Nonhuman Remains Received in a Medical Examiner Setting », *Journal of Forensic Identification*, vol. 65, n° 3, p. 223-246.
- Quatrehomme G., Beauthier J.-P., Lefèvre P., 2015, *Traité d'anthropologie médico-légale*, Paris, De Boeck, 1861 p.
- Ricqlès (de) A., 1975, « Recherches paléohistologiques sur les os longs des tétrapodes. VII : Sur la classification, la signification fonctionnelle et l'histoire des tissus osseux des tétrapodes, première partie », *Annales de paléontologie*, vol. 61, p. 51-129.
- Ubelaker D., Lowenstein J., Hood D., 2004, « Use of Solid-Phase Double-Antibody Radioimmunoassay to Identify Species from Small Skeletal Fragments », *Journal of Forensic Sciences*, vol. 49, n° 5, p. 924-929.
- Urbanová P. et Novotný V., 2005, « Distinguishing between Human and Non-Human Bones: Histometric Method for Forensic Anthropology », *Anthropologie*, vol. 43, n° 1, p. 77-85.
- Verzeletti A., Cortellini V., Cisana S., Pretto S., Cerri N., De Ferrari F., 2015, « Genetic Approach for Species Identification: Forensic Application of DNA Barcoding », *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 5:e576-e578.
- Zedda M., Lepore G., Manca P., Chisu V., Farina V., 2008, « Comparative Bone Histology of Adult Horses (*Equus caballus*) and Cows (*Bos taurus*) », *Anatomia, Histologia, Embryologia*, vol. 37, p. 442-445.

NOTES

1. Hillier et Bell 2007 ; Martiniaková *et al.* 2007.
2. Bellis *et al.* 2003 ; Ubelaker *et al.* 2004 ; Buckley *et al.* 2009 ; Verzeletti *et al.* 2015.
3. Brandt *et al.* 2002 ; Cattaneo *et al.* 2009.
4. Cuijpers et Lauwerier 2008.
5. Hillier et Bell 2007 ; Martiniaková *et al.* 2007 ; Cuijpers et Lauwerier 2008 ; Zedda *et al.* 2008 ; Crescimanno et Stout 2012 ; Dominguez et Crowder 2012 ; Brits *et al.* 2014.
6. Hillier et Bell 2007 ; Martiniaková *et al.* 2007.
7. Mulhern et Ubelaker 2001.

8. Andronowski *et al.* 2017 ; Cummaudo *et al.* 2018.
 9. Hillier et Bell 2007 ; Crescimanno et Stout 2012 ; Dominguez et Crowder 2012 ; Brits *et al.* 2014.
 10. Hillier et Bell 2007.
 11. Cooper *et al.* 2007 ; Henning *et al.* 2015.
 12. Bousson *et al.* 2004 ; Cooper *et al.* 2006, 2007 et 2011 ; Basillais *et al.* 2007 ; Britz *et al.* 2010 ; Chappard *et al.* 2013 ; Maggiano *et al.* 2016
 13. Bouxsein *et al.* 2010 ; Peter et Peyrin 2011 ; Bernardini *et al.* 2019.
 14. Cooper *et al.* 2003 ; Bouxsein *et al.* 2010 ; Peter et Peyrin 2011 ; Particelli *et al.* 2012.
 15. Peter et Peyrin 2011.
 16. Laboratoire PACEA (UMR 5199) / DRAC Aquitaine / Ville de Pessac.
 17. Pokines 2015.
 18. Quatrehomme *et al.* 2015.
 19. Urbanová et Novotný 2005 ; Martiniaková *et al.* 2006 et 2007 ; Cuijpers 2006 ; Cuijpers et Lauwerier 2008 ; Zedda *et al.* 2008 ; Brits *et al.* 2014.
 20. King *et al.* 2016.
 21. Dutailly *et al.* 2009.
 22. Riquès 1975 ; Francillon-Vieillot *et al.* 1990 ; Brits *et al.* 2014.
 23. Bloch 2017.
 24. Hastie *et al.* 2009 ; Crawley 2012 ; Faraway 2016.
 25. Brits *et al.* 2014 ; Hillier et Bell 2007 ; Cuijpers 2006 ; Martiniaková *et al.* 2006 et 2007 ; Crescimanno et Stout 2012.
 26. Cuijpers 2006 ; Martiniaková *et al.* 2006 ; Morales *et al.* 2012.
 27. Mulhern et Ubelaker 2011.
 28. Martiniaková *et al.* 2006.
 29. Morales *et al.* 2012.
-

RÉSUMÉS

La bonne attribution de restes osseux à leur espèce est déterminante en ostéoarchéologie. Si elle se fait habituellement par l'identification macromorphologique, la forte fragmentation des restes est un facteur limitant. L'analyse de la microstructure osseuse et plus particulièrement celle du réseau canalaire cortical, qui présente des caractéristiques structurales d'espèce, s'avère discriminante même dans les cas de forte taphonomisation des restes osseux. Ce travail présente les premiers résultats d'une nouvelle méthode d'identification d'espèce reposant sur l'analyse d'images tridimensionnelles du réseau canalaire cortical, appliquée à la comparaison d'ossements humains, de bœuf et de porc. Le test d'identification d'espèce, effectué grâce à la méthode statistique de forêts aléatoires, permet d'obtenir pour les restes humains un taux d'identification correct de 100 %, contre 86,2 % pour *Sus scrofa* et 79,51 % pour *Bos taurus*.

The correct attribution of bone remains to their species is crucial in osteoarchaeology. Although this is usually done by macromorphological identification, the high fragmentation of the remains is a limiting factor. The analysis of bone microstructure, and more particularly that of the cortical canal network, which presents structural characteristics of the species, proves to be discriminating even in cases of high fragmentation of the bone remains. This work presents the first results of a new method of species identification based on the 3D analysis of the cortical canal network, applied to the comparison of human, bovine and porcine bone specimens. The test of species identification, carried out using the statistical method of random forests, provides a correct identification rate of 100% for human remains compared to 86.2% for *Sus scrofa* and 79.51% for *Bos taurus*.

INDEX

Mots-clés : identification d'espèce, réseau canalaire cortical, microstructure osseuse, imagerie 3D, forêt aléatoire

Keywords : species identification, cortical canal network, bone microstructure, 3D imaging, random forest

AUTEURS

CHARLOTTE RITTEMARD

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)

OLIVIER DUTOUR

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)

HÉLÈNE COQUEUGNIOT

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)