

Appel A Projets IV : formulaire de candidature

Il n'est pas indispensable d'utiliser le présent formulaire pour soumettre un projet. Toutefois pour faciliter le travail des rapporteurs, merci de respecter l'architecture générale de ce document pour votre réponse.

Nom du correspondant : LASAYGUES Philippe

Nom du projet : Arché-US : Modélisation et imagerie ultrasonore pour l'identification d'os en archéo-paléontologie

Résumé du projet (5 lignes en anglais) : The project is part of a collaboration between the laboratories, LMA, IRPHE, LAMPEA (Aix-en-Provence), CEPAM (Nice, Sofia Antipolis) and the LC2R (Draguignan). It concerns the characterization of human and animal bones for applications in archeo-anthropology (study of ancient and paleolithic funerary rites) and zoo-archaeology (study of conservation in taphonomy, and paleolithic strategies of subsistence by bone fracturing). There is a large literature on the identification of the physico-mechanical properties of different elements and portions of human or animal bones with a recent or short postmortem interval, but very few studies, other than densitometry, on prehistoric human or animal bones. It is a challenge for the acoustic engineering and paleo-archaeology communities to study these bones.

Volet(s) complémentaires demandé(s) : Collaboration internationale Pédagogie

Contenu scientifique (3 pages maxi)

Contexte scientifique

Les gisements archéologiques et/ou paléontologiques livrent des assemblages osseux plus ou moins diversifiés et hétérogènes en termes d'espèces, de nombre d'individus (avec des âges ontogéniques divers), de nature (animaux ou humains), de conditionnement *in situ* (enfouissement, coffrage, vases ou urnes), de transformation (fossilisation, os brûlés), et de milieux de dépôts (humide, tempéré ou sec). L'étude de ces assemblages est essentielle pour déterminer et reconstituer des comportements d'utilisation et de subsistance (telle la fracturation osseuse (Bignon-lau, Malgarini, and Bonzom-Chapelle 2017)), des pratiques culinaires (Unsan, Buccio, and Magniez 2020), ou des pratiques d'inhumation ou de crémation (Crubézy 2019; Bailet, Georges, and Arlaud 2020), pour comprendre la paléontologie et les évolutions des sociétés humaines du passé (Théry-Parisot et al. 2009), et pour évaluer les paléo-environnements géographiques et climatiques. Ces matériaux ostéologiques sont fragiles et soumis à des endommagements voire à la destruction au cours du temps, et il est primordial de caractériser leur degré de conservation



Assemblage osseux diversifié (LAMPEA)

différentielle pour reconstituer les chaînes opératoires et améliorer les connaissances. Des approches sont depuis



Vue de dessus d'une urne funéraire du cite de Ashrafiyeh, Liban
Université Libanaise, PACEA UMR 5199) (CNRS - IFPO)

quelques années grandement développées dans les différentes communautés archéo-paléontologiques qui analysent les vestiges organiques ou culturels du passé (Mallye 2019). L'étude de la conservation des ossements soumis à des actions destructrices (sédimentaires, climatiques, chimiques ou mécaniques de la part de carnivores ou d'humains) constitue une étape majeure des analyses archéo-anthropologiques (Bailet, Georges, and Arlaud 2020) et zoo-archéologiques (Brugal 2015). La probabilité qu'un os se conserve suite à de nombreux processus taphonomiques est en particulier liée à sa densité qu'il conviendrait de définir tant les interprétations varient d'une communauté à

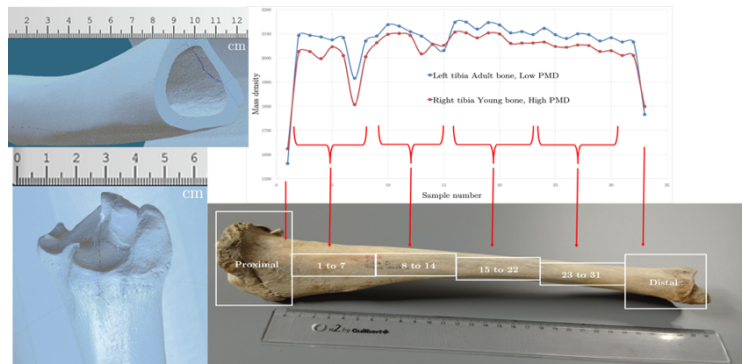
l'autre. Quelques études ont été menées sur ces questions de "densité" mais elles restent cependant limitées, et des approches complémentaires pour déterminer d'autres propriétés physico-mécaniques sont aujourd'hui envisagées (Brugal 2015). L'objet du projet *Arché-US* est de développer des protocoles ultrasonores d'interférométrie, de spectroscopie de résonances (RUS), et de tomographie, associés à des modalités multi-physiques (microtomographie par rayons X et nano-indentation), et particulièrement adaptés à l'étude multi-échelles d'assemblages osseux conditionnés.

Méthodologie

En effet, parmi les techniques de l'ingénieur, celles basées sur la propagation d'ondes ultrasonores sont particulièrement adaptées à l'étude des os longs ; matériaux élastiques du fait de leur composition chimique organique et inorganique. Il existe une importante littérature sur le sujet de l'interaction ultrasons/os en général que les os soient humains ou animaux, adultes ou juvéniles (Laugier and Grimal 2022). Mais la quasi-totalité des études porte sur des os de faibles délais post-mortem (DPM¹ < 2 ans) et sur des individus dont l'âge n'excède pas 80 ans, ou sur des os de boucherie (os frais avec tissus mous), et il y a un manque important d'information lorsque les os sont anciens, antiques voire préhistoriques, ou lorsqu'ils sont conditionnés ou transformés.

Dans le cadre d'un précédent projet (2021-2022) soutenu et financé par l'Institut "Archéologie méditerranéenne

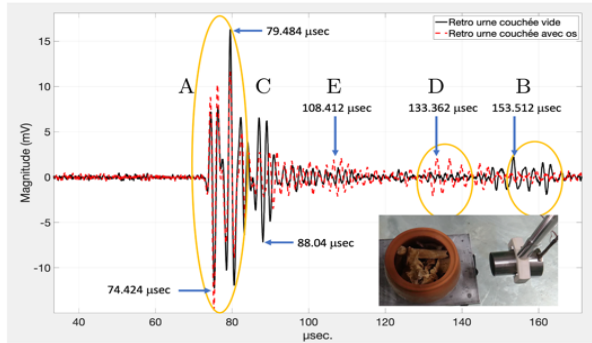
- ARKAIA", notre consortium a établi deux protocoles, l'un en zoo-archéologie, l'autre en anthropologie. Ces protocoles reposent sur des modélisations numériques et expérimentales communes, innovantes, multi-échelle et multi-physique, associant des instruments de laboratoire à fort degré de liberté, tels un scanner à ultrasons 2D/3D, des bancs de mesures interférométrique et spectroscopique (RUS), un nano-indenteur, et un nano-microtomographe X, et des outils portatifs utilisés en contrôle non destructif et en imagerie médicale.



(Gauche) Microtomographie X (Fabri de Peiresec) de la diaphyse (haut) et de l'épiphyse proximale (bas) d'un tibia de cerf. (Droite) Masses volumiques des deux tibias de cerf le long de la diaphyse dense (sauf au niveau du foramen nourricier) et aux épiphyses poreuses.

¹ DPM : Intervalle de temps écoulé depuis le décès d'un individu et l'exploitation de ses restes osseux

En zoo-archéologie, un protocole expérimental (*stage DUT MP 2A, 2022, Bilal Surugue*) pour déterminer des



Comparaison des signaux RF enregistrés en mode écho à travers l'urne en position horizontale sans os (noir) et contenant des os brûlés (rouge). A & B échos spéculaires et de fond de l'urne. C, D & E présence d'os dans l'urne

propriétés physico-mécaniques de tissus osseux d'animaux, comme la masse volumique, les vitesses des ondes acoustiques et les constantes élastiques, a été mis en place et validé en comparant l'élasticité (plexiforme vs haversienne), et l'anisotropie (orthotropie vs isotropie transverse) de 2 tibias de cerfs élaphe (*Cervus elaphus*) d'origine différente, l'un subadulte à DPM bas et l'autre plus jeune à DPM élevé. Des images microtomographiques X ont été produites pour repérer des zones de fragilité mises en correspondance avec l'élasticité des matériaux. C'est à notre connaissance la première fois qu'une telle étude

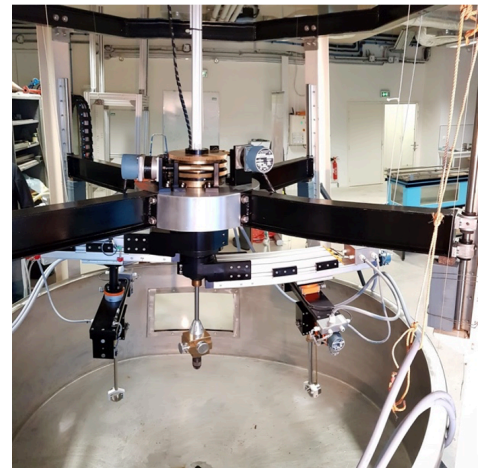
a été faite sur ce spécimen.

Parallèlement, en anthropologie, nous avons modélisé (*alternance ECM 2022, Jeanne Baldisser, et alternance ECM 2023, Matthieu Boutoille*) analytiquement, numériquement et expérimentalement la propagation ultrasonore, et l'imagerie associée, dans des urnes cinéraires artificielles contenant des fragments osseux humains. Les pratiques de l'inhumation et de la crémation en anthropologie se retrouvent fréquemment dans le monde funéraire antique et préhistorique, et l'objectif est de proposer aux anthropologues qui, historiquement (Drioux 1925), exercent et animent des sections d'archéologie humaine sur ce sujet, une modalité de contrôle en laboratoire ou/et *in situ* de spécimen sans les transporter ou les modifier préalablement.

Programme

Dans le cadre de cet appel à projet, le consortium propose d'approfondir et de faire évoluer son savoir-faire et son instrumentation sur les deux volets également.

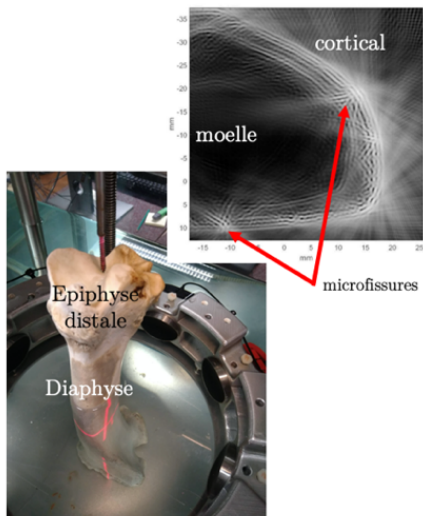
Volet "caractérisation" : Nous voudrions développer le même type d'études multi-physiques (acoustique, microtomographie, nano-indentation) sur des tibias de bœufs et de bisons domestiques récents et fossiles concernés par la fracturation osseuse. Pour comprendre la fracturation des os longs, en particulier dans des contextes paléolithiques, de nombreuses études passent par l'archéologie expérimentale comme outil pour documenter des stratégies de subsistance (par exemple, les modalités d'extraction par fracturation de la moelle osseuse pour l'alimentation). La quantification des restes osseux différencie les fragments de grande taille *vs* ceux de plus petite taille (potentiellement non déterminables) afin d'évaluer le nombre de restes produit suivant le type d'os et les techniques de percussion, leur taille, mais aussi afin de qualifier les types de fractures (spirale, longitudinale, oblique, transverses). Une description morphologique précise des points d'impacts (aboutis : encoche ou non) est associée, afin, *in fine*, de démontrer, de possibles corrélations entre nombre de coups, types de percuteurs



Vue générale du scan 10 d.d.l. Au centre du scanner, on distingue le mandrin porte-objet fixé sur son axe vertical, à droite et à gauche les chariots porte-sondes motorisés. L'ensemble est plongé dans une cuve remplie d'eau.

et structures osseuses. Lors de l'étude précédente (*stage M1, 2021-2022, Lisa Justiniany*), nous avons montré que la diaphyse des fémurs est la partie la plus facile à fracturer avec une optimisation du nombre réduit de coups. Sur le plan ingénierie, la caractérisation par interférométrie acoustique des modules d'élasticité d'un matériau isotrope transverse tel que les os longs est classiquement réalisée de manière normative sur des petits échantillons parallélépipédiques. Ce type d'essai n'est pas adapté à une caractérisation exhaustive des os au cours d'un processus de transformation. Pour pallier ce problème, des méthodes alternatives par spectroscopie de résonance ultrasonore sont utilisées sur des petits échantillons (par ex. ceux obtenus par fracturation osseuse que nous proposons d'étudier ainsi dans ce projet) de formes quelconques mais connues (dimensionnement par rayons X). Les modules d'élasticité ainsi déterminés ne sont plus biaisés par les effets, plus ou moins prononcés, de géométrie et de dimensions selon les longueurs d'onde utilisées. Dans le projet, il s'agira de caractériser acoustiquement (en adaptant le scanner à ultrasons et les 2 bancs d'interférométrie et de spectrométrie US développés au LMA), radiologiquement (microtomographie X) et mécaniquement (nano-indentation) la collection fragmentaire, d'expliquer les observations par des modélisations numériques (Comsol™ Multiphysics) appropriées, et de discuter une analyse taphonomique croisée physico-mécanique, élastique, densitométrique et de micro-dureté de la fracturation osseuse paléolithique.

Volet "imagerie" : L'objectif du travail consiste à modéliser numériquement et expérimentalement la propagation d'une onde ultrasonore à travers des os longs (bœufs et bisons) avec l'objectif d'en faire des images tomographiques ultrasonores (identifications morphométriques et contrôle non destructif de fissures



(Gauche) Scanner à ultrasons du LMA et tibia de bison. (Droite) Tomographie ultrasonore de la diaphyse d'un tibia de bison

internes), et à travers des urnes cinéraires (artificielles) contenant quantités d'os.

Pour l'imagerie des os entiers, l'idée est d'exploiter des algorithmes développés pour l'imagerie médicale clinique (Lasaygues et al. 2021). Pour les études menées en zoo-archéologie sur la "densité", les auteurs cherchent généralement à déterminer la densité minérale osseuse (DMO) par absorptiométrie biphotonique à rayons X, ou par un "simple" scanner clinique à rayons X. Or il est établi aujourd'hui que la mesure DMO, si elle rend bien compte du contenu minéral osseux, n'informe en rien sur la résistance mécanique de la structure "os" ; point fondamental pour évaluer la fracturation osseuse, par exemple. Plusieurs études montrent que les modalités ultrasonographiques permettent d'atteindre des informations plus pertinentes de la structure osseuse (Laugier and Grimal 2022). La tomographie numérique ultrasonore morphométrique fait partie de ces approches pertinentes, et le consortium a toutes les compétences requises pour mener cette approche sur des os archéologiques (Doveri et al. 2021; Lasaygues et al. 2021).

Concernant les urnes cinéraires, jusqu'à présent, les os contenus dans l'urne étaient indifférenciés (diaphyses et épiphyses, os compacts et trabéculaires, os plats, mâchoires). Dans ce projet, des essais d'imagerie tomographique dans des conditions contrôlées de laboratoire seront entrepris sur des urnes contenant des restes osseux inhumés et brûlés, potentiellement enfouis dans des sédiments. L'objectif est de proposer un outil de contrôle non destructif exploitable *in situ* pour identifier les urnes, et renseigner sur la nature des amas osseux contenus, et d'établir un protocole adapté aux anthropologues. Pour cela, des modélisations analytiques

4

et numériques seront développées pour comprendre et interpréter les phénomènes d'interaction ultrasons/os, lorsque ces derniers sont brûlés ou inhumés. L'idée est de travailler sur l'impédance acoustique des os contenus dans l'urne. Lorsque les os sont brûlés, ils perdent de la masse volumique et leur porosité augmente ce qui engendre une baisse de la vitesse de propagation des ondes à l'intérieur de l'urne ; réduction qu'il est assez simple à "visualiser" et modéliser expérimentalement et numériquement. Cependant, cette identification ne peut se faire qu'en calibrant les urnes contenant des cibles-étalons identifiées, et des os également calibrés dont la géométrie est connue, puis des os réels indifférenciés. Cette modélisation 1D amorcera les modèles d'inversion 2D mis en œuvre pour la tomographie numérique ultrasonore.

Retombées attendues.

Le projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le LMA, l'IRPHE, le LAMPEA (Aix-en-Provence), le CEPAM (Nice, Sophia Antipolis) et le LC2R (Draguignan). Le consortium regroupe des chercheurs, des enseignants-chercheurs, des ingénieurs, et des étudiants de différents niveaux et formations universitaires. Pour tous les membres du consortium, particulièrement pour les étudiants, ce projet interdisciplinaire est très enrichissant, et demande un certain investissement pour comprendre les tenants et les aboutissants de chacune des communautés. Le projet *Arché-US* est déjà soutenu et financé en partie par l'Institut "Archéologie méditerranéenne - ARKAIA" (*financement du stage de Tom Ohayon*) et par le projet TIGER (*financement de 4 mois du stage de Lisa Justiniany*).

Pour le LAMPEA, le CEPAM et le LC2R, ces études permettent de montrer à leurs communautés (zoo-archéologie, archéo-anthropologie) que des approches ingénieriques nouvelles sont possibles et pertinentes. Pour le LMA et l'IRPHE, c'est l'occasion de mettre en œuvre dans de nouveaux domaines, des méthodes et des traitements acoustiques que l'équipe développe depuis très longtemps pour des os d'animaux et d'humains, d'adultes et/ou juvéniles (Baron et al. 2021; Lasaygues et al. 2021). Le consortium est reconnu internationalement dans son domaine respectif de compétences. C'est une opportunité réelle d'interdisciplinarité et de transversalité. Pour l'Institut IMI, c'est une occasion d'établir un lien avec l'institut ARKAIA et de s'inscrire dans la dynamique proposée lors de la journée "Archéologie - Science et technologie" organisée au LMA, le 5 avril 2018, par la Fédération de Mécanique et le PR2I "Sciences et Technologies avancées". Ce travail donnera lieu à au moins 1 publication de rang A dans chacun des domaines (zoo-archéologie, archéo-anthropologie) voire trois (acoustique), et à des communications dans plusieurs congrès ; cette transversalité thématique étant appréciée par toutes les communautés.

Références

- Bailet, Paul**, Patrice Georges, and Cécile Arlaud. 2020. *La Crémation Hellénistique et Romaine à Alexandrie (Égypte). De La Fouille Des Urnes à La Restitution Des Pratiques Funéraires*. Edited by Cealex. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02111712>.
- Baron, Cécile**, Hélène Follet, Martine Pithioux, Cédric Payan, and **Philippe Lasaygues**. 2021. "Assessing the Elasticity of Child Cortical Bone." In *Bone Quantitative Ultrasound New Edition*, P. Laugier&Q. Grimal, 14:1–29. Springer. Paris.
- Bignon-lau, Olivier, Romain Malgarini, and Sacha Bonzom-Chapelle. 2017. "Fracturation Osseuse Lato Sensu et Intégration Des Chaînes Opératoires Alimentaires et Non Alimentaires Quelques Exemples Du Magdalénien Supérieur." In *Société Préhistorique Française*. Paris: Société préhistorique française.

- Brugal, Jean-Philip. 2015. *Messages d'os: archéométrie du squelette animal et humain*. Collection Sciences archéologiques. Paris: Éditions des archives contemporaines.
- Crubézy, Éric. 2019. *Aux Origines Des Rites Funéraires: Voir, Cacher, Sacraliser*. Paris: Odile Jacob.
- Doveri, Elise, Laurent Sabatier, Vincent Long, and Philippe Lasaygues. 2021. "Reflection-Mode Ultrasound Computed Tomography Based on Wavelet Processing for High-Contrast Anatomical and Morphometric Imaging." *Applied Sciences* 11 (20): 9368. <https://doi.org/10.3390/app11209368>.
- Drioux, G. 1925. "Rites funéraires paléolithiques." *Revue des Sciences Religieuses* 5 (4): 697–711. <https://doi.org/10.3406/rscir.1925.3860>.
- Lasaygues, Philippe, Luis Espinosa, Simon Bernard, Philippe Petit, and Regine Guillermin. 2021. "Ultrasound Computed Tomography." In *Bone Quantitative Ultrasound New Edition*, Springer, 11:1–36. Paris.
- Laugier, Pascal, and Quentin Grimal, eds. 2022. *Bone Quantitative Ultrasound: New Horizons*. Vol. 1364. Advances in Experimental Medicine and Biology. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91979-5>.
- Mallye, Jean-Baptiste. 2019. "Jean-Philip Brugal (Dir.): TaphonomieS. Ouvrage Du Groupement de Recherches 3591 « Taphonomie, Environnement et Archéologie »: CNRS-INEE. Éditions Des Archives Contemporaines, Paris, Collection « Sciences Archéologiques », 2017." *Quatenaire*, no. vol. 30/1 (April): 113. <https://doi.org/10.4000/quatenaire.11629>.
- Théry-Parisot, Isabelle, Sandrine Costamagno, Jean Philip Brugal, Jean-Christophe Castel, Magali Gerbe, Laurent Bouby, and Raphaële Guilbert. 2009. "La Question Des Os Brûlés Dans Les Sites Du Paléolithique: Un Programme d'archéologie Expérimentale En Taphonomie." *Les Nouvelles de l'archéologie*, no. 118 (December): 31–36. <https://doi.org/10.4000/nda.900>.
- Unsain, Dianne, Vincent Buccio, and Pierre Magniez. 2020. "Zooarchaeology, Medieval Economy and Culinary Practices: The Case of Petra Castellana Castrum (South of France)." *Journal of Archaeological Science: Reports* 30 (April): 102170. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102170>.