

Modélisation du port de tête (os et tissus mous du rachis cervical) chez les primates humains et non-humains. Calcul des incertitudes dans la prédiction des modèles et leur activation sur des hominines fossiles.

Descriptif.

L'acquisition de la posture bipède au cours de l'évolution humaine a profondément modifié les relations entre la tête et le rachis. Les équilibres posturaux sont assurés de façon économique grâce à une minimisation de la force musculaire nécessaire à l'équilibre des couples par un ajustement de la longueur des bras de levier osseux. Le passage de la posture quadrupède à la posture bipède nécessite des modifications morphologiques pour maintenir des équilibres économiques. Pour comprendre ces modifications, nous construisons des modèles morpho-fonctionnels qui associent à la forme des os (crâne, mandibule et vertèbres cervicales) la répartition des masses et les orientations des forces exercées par les muscles. Ces modèles sont construits sur des espèces actuelles, pour lesquelles les données anatomiques et mécaniques sont connues et sont ensuite appliqués aux hominines fossiles. Cependant, la modélisation, à tous ses niveaux, implique des simplifications qui fragilisent sa fiabilité. L'utilisation de la modélisation dans la construction d'hypothèses évolutives fiables nécessite d'en connaître les limites.

L'objectif de ce projet de thèse est de construire un modèle biomécanique pour les hominines et un outil mathématique robuste capable de quantifier les incertitudes de la modélisation. Ceci devrait permettre de mesurer les incertitudes des modèles prédictifs de tissus mous associés aux éléments squelettiques dans la reconstitution du port de tête et sa mobilité chez les humains et les primates non-humains actuels et de les transposer aux hominines fossiles. Un contrôle de l'exactitude des prédictions est nécessaire pour valider ces modèles et les activer.

La quantification des incertitudes est une discipline à part entière largement utilisée dans divers domaines de la mécanique, physique et mathématique mais peu ou pas du tout considérée pour la modélisation dans le domaine de l'évolution humaine. La propagation directe des incertitudes dans notre reconstruction consiste à identifier une série de paramètres qui sont de nature aléatoire, définies sur un espace de probabilité (supposé de dimensions finies) avec une mesure de probabilité P associée. Une loi de probabilité sera définie pour chaque paramètre considéré (qui peuvent être corrélés) de façon à associer à chaque réalisation un paramètre dans l'espace de probabilité une valeur réelle dans son espace de définition. Plusieurs échantillons seront ensuite considérés et propagés à travers notre modèle. Une des approches la plus classique pour quantifier les incertitudes est la méthode de Monte-Carlo qui a cependant l'inconvénient d'être très lente à converger et nécessite un nombre important d'échantillons, or chaque échantillon est une nouvelle reconstruction coûteuse. Une alternative consiste à construire des méta-modèles (ou surface de réponse) qui sont des modèles d'approximation continus. C'est cette approche qui sera retenue pour ce projet de thèse. Une attention particulière sera accordée au nombre important et varié de données et paramètres incertains, ainsi qu'à la flexibilité de notre méta-modèle pour la prise en compte de l'activation de notre reconstruction.

Dans la production de la parole, l'équilibre cranio-mandibulaire est déterminant puisqu'il participe à la forme de la cavité buccale. Nous comptons utiliser ces principes de quantification des incertitudes pour affiner les possibilités fonctionnelles des hominines fossiles chez qui seul l'os est conservé.

Ces applications font appel aux outils et compétences mobilisés au sein de l'ISCD et répondent aux objectifs du projet scientifique "Origins of Speech". Le projet de recherche doctoral bénéficiera d'un matériel d'étude original collecté dans ce cadre : des données tomographiques (scanners médicaux et IRM) d'*Homo sapiens* et de primates non-humains (Babouins, Chimpanzés) et des numérisations 3D de squelettes (crânes, mandibules, vertèbres cervicales) d'*Homo sapiens*, Gorilles et Chimpanzés des collections du Muséum national d'Histoire naturelle.

Encadrement.

Anick Abourachid – Directrice de thèse – HDR

Professeure du Muséum national d'Histoire naturelle, spécialiste de l'anatomie fonctionnelle, elle a dirigé le projet ANR Avineck portant sur l'anatomie du cou des oiseaux (2016-2019) et est membre de l'équipe de recherche « Origins of Speech » ISCD, 2020-2025.

Abourachid, A., Gagnier, B., Furet, M., Cornette, R., Delapre, A., Hackert, R., & Wenger, P. (2021). Modeling intervertebral articulation: The rotule à doigt mechanical joint (RAD) in birds and mammals. *Journal of Anatomy*, 239(6), 1287-1299.

Terray L, Plateau O, Böhmer C, Delapre A, de la Bernardie X, Abourachid A, Cornette R. (2020) Modularity of the neck in Birds (Aves) *Evolutionary Biology* doi.org/10.1007/s11692-020-09495-w

Böhmer C, PrevotEAU J, Duriez O, Abourachid A 2019 Gulper, ripper and scrapper: anatomy of the neck in three species of vultures. *J Anat* doi: 10.1111/joa.13129

Amélie Vialet - co-encadrante de la thèse.

Coordination de l'équipe de recherche "Origins of speech" (2020-2025) accueillie à l'ISCD. Coordination du projet FOTONG – Fossil tongues (2017-2018) et APESVOICE (2021-2022) dans le cadre du programme Emergence de SU. Paléoanthropologue, spécialiste de l'évolution du complexe crânien des premiers hominines eurasiatiques

Vialet A., Bijar A., Payan Y., Perrier P., Grimaud-Hervé D., Frey P., Norgeot L. (2019). Modélisation de la langue dans la cavité buccale. Application aux Néandertaliens. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris*.

Vialet A., Prat S., Wils P., Alçiçek M.C. (2018). The Kocabaş hominin (Denizli Basin, Turkey) at the crossroads of Eurasia. New insight from morphometrical and cladistical analyses. *C.R. Palevol* **17**, 17-32.

Vialet A. (2005). La face supérieure et moyenne des hominidés fossiles depuis le Pléistocène inférieur récent, Thèse de doctorat, Muséum national d'Histoire naturelle, 290p.

Hershkovitz I., May H., Sarig R., Pokhojaev A., Grimaud-Hervé D., Bruner E., Fornai C., Qua, R., Arsuaga J.-L., Krenn V.A., Martín-Torres M., Bermúdez de Castro J.-M., Martín-Francés L., Slon, V., Albessard-Ball L., Vialet A., Schöler T., Manzi G., Profico A., Di Vincenzo F., Weber G.W., Zaidner Y. (2021). A Middle Pleistocene *Homo* from Nesher Ramla, Israel. *Science* **25**, 1424-1428.

Martinez de Pinillos Gonzalez M., Martín-Francés L., Bermúdez de Castro J.-M., García-Campos C., Modesto Mata M., Martín-Torres M., Vialet A. (2020). Inner morphological and metric characterization of the molar remains from the Montmaurin-La Niche mandible: the Neanderthal signal. *Journal of Human Evolution* **145**, <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2019.102739>

Anca Belme - co-encadrante de la thèse.

Maître de Conférences au sein de l'Institut de mécanique : Institut Jean le Rond d'Alembert et membre de l'équipe « Origins of Speech », spécialiste dans la mécanique numérique, plus

précisément des méthodes adaptatives de contrôle des erreurs numériques et stochastique dans la quantification des incertitudes pour des applications a des problèmes de la mécanique.

Van Langenhove J.W., Lucor D., Alauzet F., Belme A.C. (2018). Goal-oriented error control of stochastic system approximations using metric-based anisotropic adaptations. *Journal of Computational Physics* **374**, 384-412.

Wildev T., Gorodetsky A.A., Belme A.C., Shadid J.N. (2019). Robust Uncertainty Quantification using Response Surface Approximations of Discontinuous Functions. *International Journal for Uncertainty Quantification* **9**, 415-437.

Profil de la candidature recherchée

Formation au calcul scientifique/mathématiques appliquées, avec de bonnes compétences en programmation (C++ et Matlab). Une expérience avec le logiciel ANSYS sera un plus. Eventuellement des connaissances ou des notions en modélisation par éléments finis, simulation numérique, analyse de l'erreur et des incertitudes. Intérêt pour l'évolution humaine.