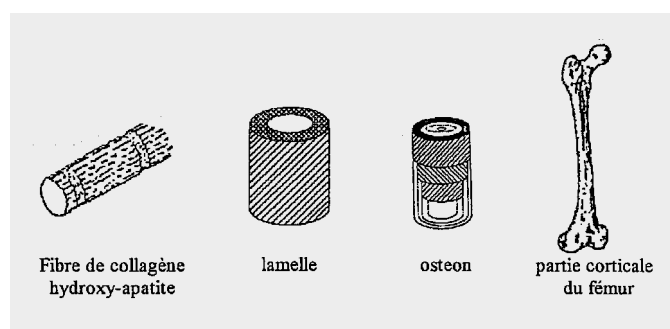


COMPRENDRE LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'OS HUMAIN GRÂCE AU CALCUL SCIENTIFIQUE

L'os humain est un matériau vivant en perpétuelle évolution. Il sait s'adapter aux sollicitations auxquelles il est soumis. Sa morphologie se transforme avec l'âge : changement de masse lors de la croissance, d'architecture et de propriétés mécaniques lors du remodelage (consolidation d'une fracture). Quelle est sa structure optimale ? Comment décrire son comportement mécanique et son adaptation fonctionnelle ? Quel est le mécanisme du remodelage osseux ? Est-il possible de prévoir les pathologies ? Des outils mathématiques ont été développés depuis une dizaine d'années pour apporter des éléments de réponse, notamment sur le comportement mécanique de ce matériau adaptatif.



Recomposition architecturale de l'os cortical lors des trois phases d'homogénéisation.

architecture complexe : des cylindres creux – les ostéons – sont juxtaposés et scellés par une matrice. Ils se constituent en un assemblage de lamelles cylindriques emboîtées les unes dans les autres. Chaque lamelle est formée d'un réseau de fibres de collagène enroulées hélicoïdalement et insérées dans des cristaux d'hydroxy-apatite. Le principe de destruction et de reconstruction de cet os est connu : des cellules creusent des galeries, d'autres cellules y apposent un tissu qui se minéralise peu à peu pour former un nouvel ostéon. Si de nouvelles directions d'ostéons apparaissent, alors les propriétés mécaniques sont modifiées.

Les biomécaniciens savent mesurer les caractéristiques physiques des composants élémentaires (collagène et hydroxy-apatite) et les orthopédistes ont besoin de connaître les champs de déformations ou de contraintes dans le fémur entier. Un calcul de structure ne peut déterminer de tels champs. Il faut donc estimer des caractéristiques physiques « moyennes » de ce matériau. La théorie mathématique de l'homogénéisation développée dans les années 1970 est le premier outil qui a été utilisé, après adaptation, pour déterminer ces caractéristiques. Etant donné un matériau composite à structure périodique et connaissant les caractéristiques physiques des composants élémentaires, on détermine les caractéristiques physiques d'un matériau fictif ayant la même géométrie et les mêmes propriétés mécaniques macroscopiques que le matériau étudié. Cette technique est meilleure que les techniques de *moyennage* classiques (calcul de quantités statistiques moyennes) car elle prend en compte l'organisation architecturale du milieu. De plus, elle permet un retour à une information microscopique à partir d'une information macroscopique.

Une seconde étude d'homogénéisation prenant en compte le fluide visqueux s'écoulant dans les divers canaux de l'os a permis de montrer que l'os se comportait comme un matériau visco-élastique à mémoire longue. La modélisation utilisée est satisfaisante du point de vue du comportement mécanique, mais n'explique pas le remodelage osseux. Comment les sels minéraux sont-ils transportés à travers le tissu osseux et comment arrivent-ils dans le tissu non minéralisé fabriqué par les cellules chargées de la reconstruction de l'os ? Ce matériau est actuellement considéré comme un milieu poreux, siège de deux phénomènes : l'écoulement d'un fluide et le transport de plusieurs solutés. Les simulations numériques effectuées à ce jour ne donnent

Sur le plan mécanique, l'os est un milieu fortement hétérogène à trois niveaux structurels et à trois échelles d'espace distinctes. Une coupe transversale, effectuée dans la partie médiane d'un os long comme le fémur, permet de distinguer, du centre vers l'extérieur : la moelle, l'os spongieux et l'os cortical. L'analyse microscopique met en évidence une

- Parmi les ouvrages les plus importants, on peut citer ceux de Ascenzi (dont les premiers articles datent de 1967), ceux de Katz (de nombreux articles écrits depuis 1971) et aussi un livre de synthèse publié par Park en 1979.
- Les cylindres s'appellent les ostéons, le trou interne le canal de Havers et la matrice le système interstitiel.

pas des résultats suffisamment corrélés aux observations expérimentales. Cette différence est liée, soit à la simulation numérique elle-même (la difficulté majeure étant de déterminer des paramètres que les biomécaniciens ne savent pas encore mesurer), soit à un processus physique non pris en compte jusqu'à présent.

Le calcul scientifique a permis de mieux comprendre le comportement mécanique de ce matériau fort complexe qu'est l'os. Son apport pour les biomécaniciens est indéniable et contribue à une meilleure compréhension des processus régissant le remodelage osseux. De nombreux développements sont encore à mettre en œuvre ou même à concevoir. Une question fondamentale reste posée : quel est le processus de transmission de l'information entre échelle macroscopique (l'os) et échelle microscopique (la cellule) ?

Référence :

- Crolet J.-M., Aoubiza B. and Meunier A. Compact bone : Numerical simulation of mechanical characteristics. *J. of Biomechanics*. Vol. 26, n° 6, pp. 677-687, 1993.

Contact chercheur :
Jean-Marie CROLET.
Équipe de mathématiques
de Besançon,
CNRS-Université de Besançon,
mél : jmcrolet@univ-fcomte.fr
<http://pegase.univ-fcomte.fr>

Contact département
des sciences physiques
et mathématiques du CNRS :
Frédérique LAUBENHEIMER,
tél. : 01 44 96 42 63
mél : [frederique.laubenheimer@](mailto:frederique.laubenheimer@cnrs-dir.fr)
[cnrs-dir.fr](mailto:frederique.laubenheimer@cnrs-dir.fr)