

Nouvelle approche de modélisation de milieux poreux. Application à l'os trabéculaire

G. AUFORT¹, R. JENNANE¹, R. HARBA¹

A. GASSER², D. SOULAT², C. L. BENHAMOU³

¹LESI, Laboratoire d'Electronique, Signaux, Images, UPRES EA 1715 et GdR ISIS du CNRS

12, rue de Blois, Université d'Orléans, France

Gabriel.Aufort@univ-orleans.fr

²LMSP, Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés, UMR CNRS 8106

³Equipe INSERM U658, Centre Hospitalier Régional d'Orléans, France

Résumé – Dans de nombreux domaines tels que la science des matériaux ou l'imagerie médicale, il est intéressant d'évaluer les propriétés mécaniques d'une structure. Pour ce faire, l'analyse par éléments finis est souvent utilisée. Cependant, son application à des milieux poreux complexes est limitée, car le nombre d'éléments nécessaires pour représenter la structure interne est très grand. Dans cette communication, nous proposons une nouvelle approche par éléments finis qui prend en compte la topologie de la structure étudiée. Pour cela, nous implémentons et améliorons une technique récente basée sur le squelette 3D, permettant de caractériser des milieux poreux complexes. Chaque travée de la structure interne peut alors être représentée par une chaîne de poutres rectilignes auxquelles sont attribuées les propriétés de l'arche. Cette approche permet de réduire considérablement le temps de calcul nécessaire à la simulation mécanique par éléments finis tout en présentant une bonne adéquation avec une technique de référence. Nous avons évalué cette technique sur des vecteurs de test, puis appliqué notre méthode sur des échantillons d'os trabéculaire afin d'en quantifier précisément l'élasticité. Ce nouveau procédé de modélisation donne de meilleurs résultats de rigidité par rapport aux techniques à éléments poutre existantes sur des vecteurs de test. Cette tendance se confirme également lors de son application à l'étude de la microarchitecture de l'os trabéculaire.

Abstract – It is very interesting in many fields like material science or medical imaging to evaluate the mechanical properties of a structure. Finite elements analysis is often used for this purpose. However, its application to complex porous media like trabecular bone is limited because of the huge amount of elements that are needed to accurately represent the structure. In this communication, we propose a new finite elements approach which takes in account the topology of the studied structure. For that we implement and improve a recent technique based on the 3D skeleton, which allows characterizing complex porous media. Each trabeculae of the internal structure can then be modelled as a rectilinear-beams-chain with the properties of the arch. This approach significantly reduces the finite elements mechanical simulation's computing time while preserving the accuracy of the results, according to a reference model. We evaluated this technique on test vectors, then applied our method on trabecular bone samples in order to precisely quantify their elasticity. This new model gives better stiffness results on test vectors compared to existing beam-elements techniques. This trend is confirmed when the model is used for trabecular bone microarchitecture analysis.

1. Introduction

Les milieux poreux complexes de type éponge formés d'arches ou de travées ont des caractéristiques de rigidité particulières qui ont toujours suscité l'intérêt des chercheurs. Les propriétés mécaniques de ce type de matériaux sont déterminées non seulement par leur porosité, mais aussi par l'arrangement des travées dans l'espace. Evaluer numériquement la rigidité de milieux poreux est un challenge en termes de ressources et de temps de calcul, qui n'est envisageable de nos jours qu'à l'aide des éléments finis [1]. Cependant cette estimation reste difficile car elle requiert des images à haute résolution et un grand nombre d'éléments

nécessaires pour une représentation fidèle du matériau étudié. En effet, la simulation mécanique par éléments finis est un outil qui nécessite des modèles très denses en éléments pour atteindre une précision satisfaisante.

Dans [2], une technique basée sur le squelette 3D permet de segmenter l'architecture interne du matériau sous forme de travées élémentaires et de modéliser cette structure par un réseau de poutres rectilignes. Cette nouvelle approche permet de générer un nouveau modèle pour les éléments finis qui nécessite moins d'éléments et donc moins de ressources. Ce modèle s'est avéré non représentatif des propriétés mécaniques de la structure car il ne tient pas compte de la forme de chaque travée.

Nous avons développé une nouvelle technique elle aussi basée sur le squelette 3D qui permet grâce à un procédé original de découpage géométrique de créer des modèles simplifiés composés d'éléments de type poutre et qui tiennent compte de la courbure des travées. Nous exposons dans ce papier notre nouvelle méthode et validons ses résultats à l'aide de vecteurs de test. Enfin, nous présentons son application à l'analyse de la microarchitecture osseuse.

2. Prétraitements

2.1 Squelettisation 3D

Les travaux présentés dans cette communication ont été menés sur des volumes numériques représentant des milieux poreux biphasiques. Toutes les images 3D utilisées ici sont donc des images binaires, où les voxels blancs (valeur 255) correspondent à la phase solide, et les voxels noirs (valeur 0) à l'arrière plan, soit la phase de pore. Les voxels sont assimilés à des cubes régulièrement disposés sur un maillage isotrope, ce qui permet de traiter les données de manière géométrique, en parlant de sommets, de faces et d'arêtes. Afin de ne conserver qu'une seule composante solide connexe dans l'échantillon numérique, une version 3D de l'algorithme de Hoshen-Kopelman [3] permet de ne conserver qu'un seul amas solide de voxels 26-connexes (qui ont au moins un sommet en commun). Ensuite, nous procédons au calcul du squelette 3D filaire. Pour cela, nous avons implémenté un algorithme de squelettisation par amincissement [4], car ce type de technique garantit la conservation de la topologie de l'objet, notamment sa connectivité. La préservation de la connectivité de la microarchitecture du matériau analysé est essentielle car elle est fortement liée à sa rigidité. La figure 1 montre un exemple de squelette filaire obtenu avec cette technique pour le vecteur de test n°1.

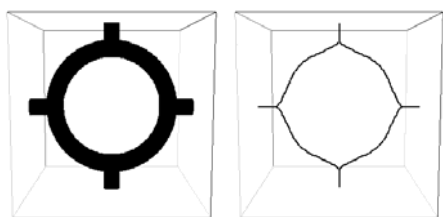


FIG. 1 : Vecteur de test n°1 de taille 64^3 et son squelette filaire

2.2 Analyse de la structure 3D

L'analyse du squelette 3D est réalisée à l'aide d'un procédé de classification et de labellisation des arches de la structure [5]. La classification des voxels du squelette consiste à marquer chacun des éléments qui le composent en fonction de son rôle dans la structure du volume (voxel isolé, voxel appartenant à une branche, voxel de type nœud ou voxel de terminaison). L'étape de labellisation des arches consiste à affecter un identifiant unique à chacun des chemins 26-connexes du squelette 3D. La structure de l'objet étudié se

décrit alors sous la forme d'un réseau de chemins individualisés interconnectés comme illustré en figure 2.

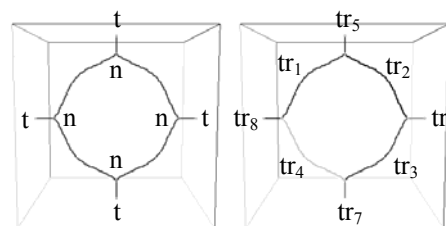


FIG. 2 : Classification et labellisation du vecteur de test n°1 (n : nœud, t : terminaison, tr_n : travée)

Le squelette labellisé ainsi obtenu peut être utilisé afin de segmenter le volume original par croissance de régions. La figure 3 montre le résultat de la segmentation assistée par le squelette sur le vecteur de test n°1. L'échantillon segmenté est utilisé pour mesurer les paramètres de chaque arche, tels que son volume, sa longueur ou sa section moyenne. Il est également possible de déduire à partir de ce réseau interconnecté des paramètres tels que le nombre d'arches, le nombre de nœuds ou encore la densité de connectivité (caractéristique d'Euler-Poincaré).

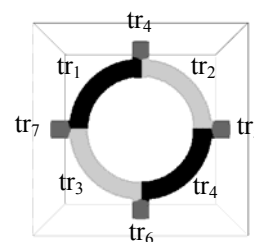


FIG. 3 : Vecteur de test n°1 segmenté (différentes nuances de gris) à l'aide de son squelette labellisé (tr_n : travée)

3. Modélisation par éléments finis

Les Eléments Finis (EF) [1] sont abondamment utilisés dans le domaine des matériaux et de la mécanique comme outil puissant de simulation. Dans cette section, nous décrivons les différents modèles utilisés pour la simulation de compression mécanique sur des milieux poreux. La technique de référence dans ce domaine est la conversion directe de voxel à élément, qui consiste à transformer les voxels de la structure 3D étudiée en briques élémentaires à 8 nœuds. La seconde technique, plus récente, consiste à remplacer chaque travée de la structure par une poutre rectiligne [2]. Enfin, nous présentons notre nouvelle méthode et expliquons le principe du découpage géométrique. Pour chacune de ces trois méthodes, nous avons généré les modèles au format d'entrée du logiciel d'analyse par éléments finis *Abaqus* [6].

3.1 Conversion voxel à élément

La conversion de voxel à élément est le procédé le plus simple que l'on puisse utiliser pour transformer un objet 3D discret en un modèle d'éléments finis. C'est également la

technique la plus précise puisqu'il n'y a aucune perte d'information au niveau géométrique. Cependant, pour atteindre une précision satisfaisante, cette approche nécessite des images haute résolution. De plus, la conversion en éléments finis de ces images génère un très grand nombre d'éléments, environ 41 millions par cm^3 pour une image scanner 3D isotrope de $12 \mu\text{m}$ de résolution. La taille des modèles et le temps de calcul sont alors considérables. La figure 4 montre un exemple de conversion voxel à élément pour un vecteur de test n°2.

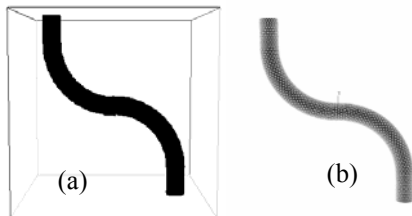


FIG. 4 : vecteur de test n°2 (a) et son modèle équivalent voxel à éléments (b)

3.2 Modèle poutre

Une équipe a publié en 2004 des travaux [2] basés sur le squelette permettant de créer un modèle par éléments finis où chaque travée de la structure est représentée par une poutre rectiligne. Ce procédé possède le grand avantage de diminuer de manière significative le temps de calcul, puisque ce dernier est lié au nombre d'éléments, mais s'est avéré non représentatif des propriétés mécaniques de la structure étudiée. Nous avons implémenté cette technique afin de comparer ses performances avec la conversion de voxel à élément et notre nouveau modèle à chaîne de poutres. La figure 5 montre le modèle poutre rectiligne obtenu dans le cas du vecteur n°2, où l'on remarque aisément l'approximation géométrique qui peut fausser les calculs de rigidité mécanique.

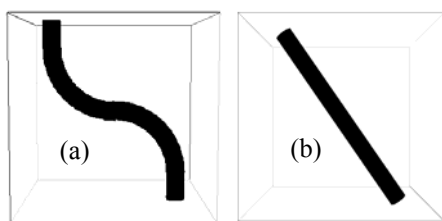


FIG. 5 : Vecteur test n°2 (a) et son modèle poutre rectiligne (b)

3.3 Modèle chaîne de poutres

Notre nouvelle approche de modélisation par éléments finis consiste à représenter chaque travée du squelette 3D par une chaîne de poutres qui s'adapte à la géométrie de sa structure. Pour cela, nous avons implémenté une opération de découpage illustrée par la figure 6. Ce procédé peut être appliqué à différents degrés de précision en faisant varier le nombre de découpes. Le suivi géométrique de la courbure est

alors affiné à mesure que l'on augmente le nombre de nœuds intermédiaires.

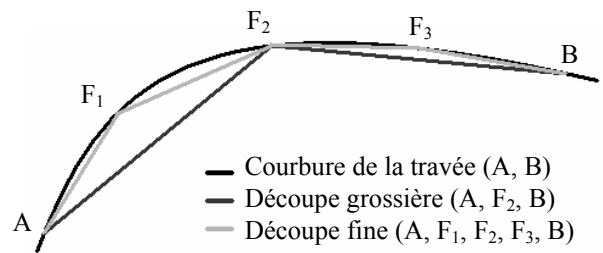


FIG. 6 : Illustration du procédé de découpage de la courbure des travées

Notre nouvelle technique réduit considérablement le temps de calcul et les ressources nécessaires aux simulations par conversion voxel à élément tout en préservant les propriétés topologiques et géométriques de la structure originelle. Chaque élément poutre se voit affecter une section moyenne mesurée sur la travée mère. Cette étape d'optimisation permet non seulement de prendre en compte la courbure des travées non rectilignes mais aussi de tenir compte de chemins multiples qui peuvent exister entre deux nœuds de la structure, ce que la technique [2] ne pouvait pas distinguer. La figure 7 présente deux modèles chaîne de poutres obtenus pour le vecteur n°2, pour deux degrés de précision différents.

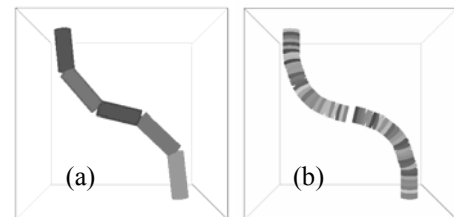


FIG. 7 : Modèles chaîne de poutres du vecteur de test n°2, de précision grossière (a) puis fine (b)

4. Comparaison des modèles

Nous avons étudié le comportement mécanique de structures 3D pour les trois modèles expliqués précédemment. En appliquant un faible déplacement en compression sur des faces opposées (ici haut et bas), il est possible de déterminer avec *Abaqus* la rigidité de chaque modèle numérique. Pour les formes simples de test nous avons également comparé ces résultats à une valeur de rigidité de référence obtenue directement à partir de la forme CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Enfin, nous présentons une application de notre nouvelle méthode à l'étude de la microarchitecture trabéculaire osseuse.

4.1 Vecteurs de test

Le tableau 1 présente les résultats obtenus pour les simulations mécaniques des vecteurs de test n°1 et n°2, avec les rigidités mesurées et le nombre de nœuds des modèles.

TAB. 1 : Résultats mécaniques pour les vecteurs de test

Modèle EF	Vecteur n°1		Vecteur n°2	
	Rigidité N/mm	Nb. de noeuds	Rigidité N/mm	Nb. de noeuds
Référence Abaqus	101,24	31978	1,69	27553
Voxel à élément haute résolution	106,89	188040	1,65	99414
Voxel à élément faible résolution	130,63	5802	3,09	3099
Chaîne de poutre fin	94,49	238	1,69	128
Chaîne de poutre grossier	127,21	16	2,03	6
Poutre rectiligne	189,18	8	6,16	2

Nous avons comparé les différents modèles sur une même plate-forme PC type Pentium IV biprocesseur à 2.8 GHz avec 1 Go de Ram. La première remarque à faire sur les résultats concerne le nombre d'éléments du modèle. En effet, les modèles qui utilisent le squelette (poutre simple et chaîne de poutre) nécessitent beaucoup moins d'éléments finis que la conversion voxel à élément, ce qui se traduit par une diminution forte du temps de calcul. En guise d'ordre de grandeur, une simulation peut être réduite de quelques heures à quelques dizaines de secondes. On voit également que le modèle à chaîne de poutres améliore nettement les résultats comparé au modèle à poutres rectilignes. C'est à ce niveau que se manifeste la précision géométrique apportée par l'opération de découpage. Le modèle chaîne de poutres fin donne une valeur de rigidité proche de celle des modèles à conversion directe. Plus le découpage est fin, plus la rigidité se rapproche de la valeur de référence obtenue avec la forme CAO ou par le modèle voxel à élément à la plus forte résolution disponible.

4.2 Application à l'os trabéculaire

Après avoir observé les améliorations apportées par notre nouveau modèle en termes de précision lors de la simulation mécanique, nous avons appliqué le procédé à l'étude de la microarchitecture de l'os trabéculaire. Les échantillons utilisés ici ont été acquis à l'aide d'un micro-scanner, à la résolution de 12 μm par voxel. Les images ont ensuite été reconstruites en 3D à partir des coupes du scanner, puis filtrées et enfin binarisées afin de travailler avec des milieux biphasiques. La figure 8 montre un exemple d'échantillon d'os numérique et de modèle chaîne de poutre associé. Cette nouvelle technique permet de caractériser la sensibilité des échantillons à une compression mécanique. Dans ce cas précis, les tailles de données mises en jeu sont si grandes qu'il n'est pas envisageable de simuler des modèles voxel à élément sur une station non dédiée à cet usage [6]. Ce nouveau modèle nous permet de mettre en œuvre des simulations mécaniques pour des objets complexes sur une machine de type PC.

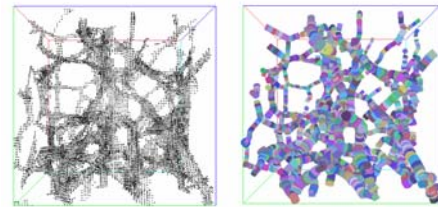


FIG. 8 : Illustration d'un échantillon d'os trabéculaire de 3,8 mm³ et d'un modèle chaîne de poutre correspondant

Malgré le manque de valeurs de référence pour nos échantillons osseux, on retrouve dans le tableau 2 les mêmes tendances que les résultats obtenus dans le cas des 2 vecteurs de test. A savoir, le modèle poutre rectiligne surestime fortement la rigidité de l'échantillon comparé au modèle chaîne de poutres.

TAB. 2 : Résultats mécaniques pour un échantillon d'os

Modèle EF	Rigidité en N/mm	Nombre de noeuds
Chaîne de poutre fin	60,16	5716
Chaîne de poutre grossier	91,11	521
Poutre rectiligne	101,96	412

Les travaux que nous menons actuellement sur ce thème ont pour objectif d'optimiser encore les modèles afin de les rendre plus fidèles aux propriétés réelles des matériaux poreux représentés. Ainsi les futurs modèles pourraient intégrer mieux encore la géométrie des milieux en utilisant différents types d'éléments finis plutôt que de simple poutres. Nous envisageons également de corrélérer les résultats obtenus en simulation avec des tests mécaniques expérimentaux sur des échantillons réels afin de valider le protocole de simulation.

Références

- [1] J.L. Batoz, G. Dhatt, *Modélisation des structures par éléments finis*, édition Hermès, 1990.
- [2] Pothuau L, B. V. Rietbergen, C. Charlot, E. Ozhinsky, S. Majumdar, *A new computational efficient approach for trabecular bone analysis using beam models generated with skeletonized graph technique*, Computer methods in Biomechanics and biomedical engineering, vol. 7, N° 4, august 2004, pp. 205-213
- [3] J. Hoshen, R. Kopelman, *Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm*, Phys. Rev. B 14, 3438-3445 (1976), Issue 8, October 1976
- [4] C. Min Ma, M. Sonka, *A Fully parallel 3D thinning algorithm and its applications*, Computer vision and image understanding, Vol. 64, n°3, pp. 420-433, November 1996.
- [5] G. Aufort, *Caractérisation de la microarchitecture trabéculaire osseuse par son patron 3D*, rapport de DEA, Université d'Angers, 2004.
- [6] Harun H. Bayraktar, *Nonlinear micro finite element analysis of human trabecular Bone : a study*, Technical Support Engineer, ABAQUS Inc.