

## **Outils d'analyse morphologique de microstructures : application l'étude de l'anisotropie de l'os trabéculaire.**

### ***Tools for microstructures morphological analysis: application to the trabecular bone anisotropy.***

Christophe Cluzel<sup>1,2</sup>, Nicolas Rogalski<sup>3</sup> et Sébastien Laporte<sup>3</sup>

1: Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS,  
LMPS -Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay  
91190, Gif-sur-Yvette

2 : Institut Universitaire de Technologie d'Evry-val-d'Essonne,  
Département Science et génie des matériaux

3 : Arts et Métiers Institute of Technology, Université Sorbonne Paris Nord,  
Institut de Biomécanique Humaine George Charpak (IBHGC),  
75013 Paris

e-mail : nicolas.rogalski@ensam.eu et sebastien.laporte@ensam.eu

### **Résumé**

Les renforts dans l'os trabéculaire sont constitués d'un enchevêtrement de plaques et de poutres dont l'organisation de la microstructure est complexe. Les simulations de comportement d'os complet avec ou sans prothèse représentent souvent la partie trabéculaire par un milieu homogène et isotrope. Des représentations par éléments finis à base de maillages directs de microstructure issues de tomographie posent le problème du coût de calcul et de la difficulté à comprendre l'influence de l'organisation de la microstructure. Une approche topologique basée sur une squelettisation de la structure est intéressante mais assez couteuse et ne fournit pas d'outil de lecture de l'anisotropie induite par la géométrie. On présente ici des outils d'analyses de la microstructure basé sur l'exploitation des descriptions discrètes par des triangles (format de type .stl) des enveloppes issues de tomographies. La démarche d'analyse des types d'objet, poutres ou plaques, est basée sur la notion de courbure locale, alors que la démarche d'analyse de l'anisotropie de chaque objet est basée sur une description spatiale des orientations des surfaces de l'ensemble des triangles. Appliquée à différents échantillons d'os trabéculaires, ces outils permettent de retrouver la, ou les orientations des plaques et celles des poutres lorsqu'elles sont orientées.

It is a set of plates and beams whose microstructure organization is complex.

### **Abstract**

The reinforcement in the trabecular bone consists of a tangle of plates and beams whose microstructure organization is complex. Full-bone simulations with or without prosthesis often represent the trabecular part by a homogeneous and isotropic medium. Finite element representations based on direct meshes of microstructure from tomography pose the problem of calculation cost and difficulty in understanding the influence of microstructure organization. A topological approach based on structure skeletonization is interesting but rather expensive and does not provide a tool for reading the geometry-induced anisotropy. Here are tools for microstructure analysis based on the exploitation of discrete descriptions by triangles (format type .stl) of envelopes from tomography. The analysis of object types, beams or plates, is based on the notion of local curvature, whereas the analysis of the anisotropy of each object is based on a spatial description of the orientations of the surfaces of all the triangles. Applied to different samples of trabecular bones, these tools allow to find the orientation of the plates and those of the beams when they are oriented.

**Mots Clés :** Biomécanique, os trabéculaire, microstructure, anisotropie

**Keywords :** Biomechanics, trabecular bone, microstructure, anisotropy

### **1. Introduction**

La modélisation du comportement mécanique d'un os humain est délicate car les géométries sont complexes et varient continuellement dans la structure. De plus, les comportements mécaniques ne sont pas isotropes, ni pour la réponse élastique, ni pour la rupture. Cette anisotropie est orientée pour l'os par la direction des ostéons ou des trabécules qui le compose. Selon le modèle de Wolff [1][2], ces orientations sont naturellement adaptées aux directions de sollicitations. Mais le chargement est particulièrement complexe à décrire, car il résulte non seulement de la géométrie des os, des liaisons et des points d'attaches des tendons et ligaments [3], mais il est non monotone et varie beaucoup en fonction des mouvements de chaque personne. Plutôt que de modéliser a priori

un processus de remodelage sous un chargement moyen pour définir ces orientations, la démarche proposée est de s'appuyer sur des tomographies et de construire des outils pour en extraire de façon automatique les directions d'anisotropie dans un Volume Élémentaire Représentatif. Un premier travail expérimental sur l'os cortical (partie dense constituant l'enveloppe extérieure des os dont la porosité est de l'ordre de 5 à 10 %) a été réalisée dans [4] pour identifier les directions d'orthotropie d'un fémur et les implanter dans un maillage personnalisé pour réaliser un calcul par éléments finis. L'os trabéculaire ayant une porosité de 75 à 95 % [5], permet une distribution des charges appliquées en surfaces minces externes de l'os sur les zones plus épaisses d'os cortical. Pour une simulation complète du comportement d'un fémur, notamment pour optimiser l'implantation d'une prothèse, il est donc souhaitable de prendre en compte l'influence de l'os trabéculaire.

Pour une question de simplicité de modélisation, l'os trabéculaire est généralement décrit comme isotrope, mais une description plus fine de sa microstructure permet de mieux comprendre la distribution des contraintes. Le premier pas consiste à différencier les composantes de type plaque de celle de type poutre. Dans la littérature, l'indicateur SMI (Structural Model Index) permet de quantifier les proportions Plaques/poutres. Il est décrit dans [6] et est largement utilisé pour quantifier l'état ostéoporotique car ce rapport diminue avec la dégradation de l'os mais il ne permet pas d'attribuer à chaque éléments une appartenance plaque ou poutre. Le deuxième point d'amélioration de la description de la microstructure est de quantifier géométriquement l'anisotropie c'est-à-dire l'orientation des trabécules. Les indicateurs classiques de description de l'anisotropie recherchent généralement des informations macroscopiques sur la géométrie à relier avec un comportement élastique type prédéfini [7]. L'anisotropie est souvent assez faiblement marquée lorsque l'étude ne s'applique pas aux constituants décrits séparément. Les approches passant par une squelettisation de la microstructure sont plus précises sur la description de la microstructure, mais sont couteux en temps de calcul.

Dans le développement proposé, on cherche d'une part à différencier chaque triangle de discrétisation de la géométrie de la microstructure en lui attribuant une appartenance plaque ou poutre, puis à en déterminer séparément les orientations, toujours à partir des triangles de discrétisation géométrique.

## 2. Matériaux

Le matériau étudié est l'os trabéculaire. C'est la partie très poreuse visible en gris sur la (Fig. 1) de l'os située à l'intérieur de la géométrie dont la peau est constituée d'os cortical (os dense) visible en blanc (Fig. 1). La microstructure type est visible via une tomographie d'une ½ éprouvette cylindrique (Fig. 2). Dans le cas présenté, des plaques sont visibles avec une orientation très marquée, puis des petites poutres semblant relier les plaques entre elles. Dans cette image, l'épaisseur des plaques ou le diamètre des poutres est de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm

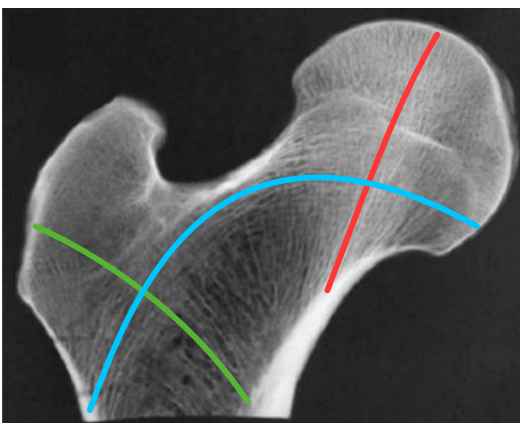


Fig. 1. Tracé des orientations des trabécules sur une tête

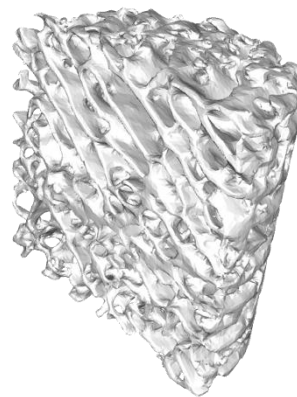


Fig. 2. Exemple de trabécules de type plaques orientées

A une échelle plus large, des orientations sont visibles dans la coupe de la tête fémorale d'un os humain. Comme illustrée (Fig. 1) par les traits vert, bleu et rouge, ces lignes de renforts semblent arriver presque tangentielles aux zones corticales épaisses, mais apparaissent perpendiculaires à la surface de la sphère de la tête fémorale. Dans certaines zones, ces lignes semblent seules, alors qu'au centre, elles se croisent. Ces orientations ont été décrites par Wolff (dans [1]) comme résultat d'une adaptation naturelle des axes de renforts aux différentes sollicitations mécaniques.

### 3. Objectifs / problématique

Pour une modélisation fine, on cherche, pour chaque élément de volume représentatif (dimension de l'ordre d'une sphère de diamètre 3 mm), à différencier les plaques des poutres, puis à extraire dans chaque type, la direction privilégiée unique ou double en cas de croisement de renforts. Ce sont les outils nécessaires à ces analyses géométriques qui sont décrits dans cet abstract. L'étape suivante consistera à tomographier puis analyser l'ensemble de la partie trabéculaire d'une tête fémorale via des découpes de multiples éprouvettes. Enfin, il restera à relier les propriétés mécaniques de chaque trabécule aux informations géométriques via des campagnes d'essais.

### 4. Outils de séparation plaque/poutre

Les données utilisées sont des images issues de tomographie de petits échantillons de 8 mm de diamètre dont les trabécules ont été isolées et maillées [8]. Le format du fichier de données est ".stl", donc les coordonnées des nœuds, la surface et la normale extérieure sont définies explicitement pour chaque élément. Les premiers paramètres calculés pour chaque triangle "i" via l'algorithme de [9] sont les courbures principales :  $k_{1i}$  et  $k_{2i}$ . Le critère utilisé est qu'un triangle est attribué à une plaque si sa courbure est plus faible de celle des petites trabécules en forme de poutre, soit pour une poutre de diamètre  $2r$  :

$$k_{i-moyen} = \frac{1}{2} \sqrt{k_{1i}^2 + k_{2i}^2} < k_{seuil} = \frac{\alpha}{2r} \quad (1)$$

Ou " $\alpha$ " est un paramètre d'adaptation utile pour régler la prise en compte ou non des pieds de poutres dont la courbure est double. La valeur choisie est :  $\alpha = 0,4$

Les triangles restants appartiennent soit à des plaques, soit à des poutres s'ils peuvent être connectés via un nombre limité de voisins. Ainsi, un patch est formé des "p" éléments voisins de chaque élément n'appartenant pas encore à une plaque. L'élément testé est attribué à une plaque si le patch ne peut être fermé. Cette deuxième étape permet d'attribuer les bords de plaques et certains éléments isolés à des plaques. Le nombre d'éléments voisins est fonction du rayon moyen des poutres et de la résolution par :

$$p = \frac{\pi r}{résolution} \quad (2)$$

Le résultat de cette séparation plaque / poutre est présenté (Fig. 5 a) sur une géométrie modèle, puis (Fig. 5 b à d) le résultat de la séparation de chaque élément du maillage (en rouge pour les plaques et en bleu pour les poutres) ainsi que les taux surfaciques de chacun. On constate (Fig. 5 b) que la forte proportion de poutre correspond aussi à une forte porosité.

### 5. Outils de description géométrique de l'anisotropie

Il est intéressant de décrire l'anisotropie, mais de façon séparée pour chaque type. L'objectif est de ne pas imposer a priori une hypothèse d'orthotropie. On utilise la moyenne des directions des triangles de discrétisation mais pas sur l'ensemble des directions de l'espace pour ne pas mélanger les informations. Pour une information polaire des directions de triangles, l'espace est divisé en  $K$  secteurs dont chaque direction est donnée par le vecteur  $\vec{u}_j$ . Le nombre de secteur n'intervient pas

sur la précision des informations, mais uniquement sur le lissage de la représentation polaire. Pour une direction donnée, un filtre passe bande décrit par l'équation (Eq. 3) de largeur et de sévérité réglables est utilisée afin de quantifier toutes les orientations de triangles reliées la direction choisie. En fait, deux versions sont disponibles selon que les directions intéressantes du triangle soit la normale illustré (Fig.3) ou l'appartenance au plan du triangle illustré (Fig. 4).

$$F_{ij} = \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\pi/2 - |\theta_{ij} - \lambda|}{\pi/2 - \theta_o}\right)^s} \right] \quad (3)$$

$F_{ij}$  : Filtre passe bande pondérant le poids d'une facette n°i pour une direction  $\vec{u}_j$  donnée.

$\theta_{ij}$  : Angle entre la direction d'intérêt  $\vec{u}_j$  et la normale à la facette n°i :  $\vec{n}_i$

$\theta_o$  : Ouverture angulaire.

$s$  : Paramètre de sévérité de la transition.

$\lambda$  : Paramètre d'inversion du filtre ( $\lambda = \pi/2$  pour les axes des poutres et  $\lambda = 0$  pour les normales aux plaques).

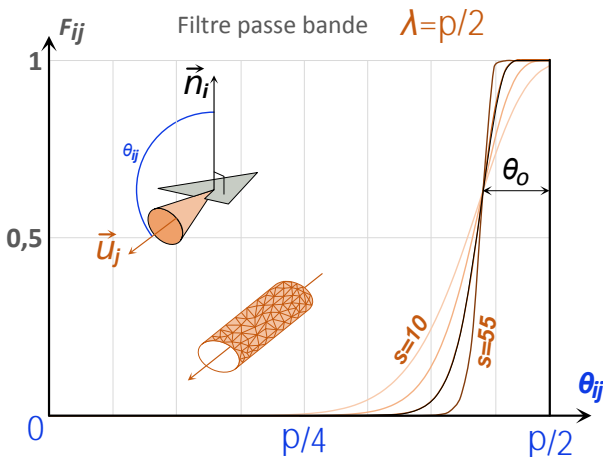


Fig. 3. Filtre passe bande de pondération de chaque facette de normale  $\vec{n}_i$  par rapport à la direction  $\vec{u}_j$ . Avec  $\lambda = \pi/2$ , utilisé pour visualiser les directions des poutres

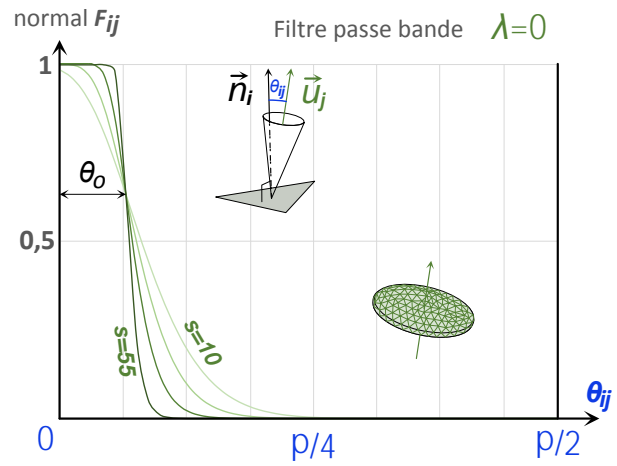


Fig. 4. Filtre normal passe bande de pondération de chaque facette de normale  $\vec{n}_i$  par rapport à la direction  $\vec{u}_j$ . Avec  $\lambda = 0$ , utilisé pour visualiser les directions normales aux plaques.

Pour représenter la contribution de l'ensemble des surfaces à un secteur angulaire donné, la contribution de chaque facette est sommée, ce qui donne un indicateur d'Intensité Directionnelle (Eq. 4).

$$DI(\vec{u}_j) = K \frac{\sum_{i=1}^N F_{ij} S_i}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N F_{ij} S_i} \quad (4)$$

$S_i$  : Surface de la facette n° i

$K$  : nombre de secteurs angulaires pour une description polaire.

$N$  : nombre de facettes pour la description de la géométrie.

$DI$  : Intensité Directionnelle pour chaque secteur polaire, appliquée aux plaques ou aux poutres.

L'indicateur ainsi obtenu est calculé pour chaque secteur angulaire et est représenté sur un diagramme polaire. On retrouve (Fig.5-a) que sur la structure modèle que les deux plaques en rouge sont décrites soit par les  $DI$  (avec  $\lambda = \pi/2$ ) sous forme d'une galette dans le même plan que les plaques, soit avec le  $DI$  de normales (avec  $\lambda = 0$ ) sous une forme tubulaire très orientée suivant la normale aux plaques. Cette deuxième représentation s'avère plus simple pour décrire deux

directions de plaques imbriquées. Enfin la représentation des  $DI$  exhibe assez clairement les directions de poutres multiples.

L'application de cet indicateur à trois VER (Fig. 5-b, c et d) permet une lecture plus simple des diverses anisotropies géométriques.

Le cas (b) avec un taux surfacique de 36% de poutres représente une microstructure avec peu de grandes plaques. On constate que l'orientation moyenne des poutres est sensiblement perpendiculaire au plan moyen des plaques.

Le cas (c) est typique d'une microstructure avec une majorité de plaques clairement orientées suivant une unique direction puisque l'indicateur  $nDI$  ne montre qu'un seul sommet.

Pour le cas (d), le  $nDI$  révèle une microstructure avec une majorité de plaques, mais comportant deux familles d'orientations. Pour les deux derniers cas, les poutres sont en faible proportions et ne montrent pas d'orientation nette.

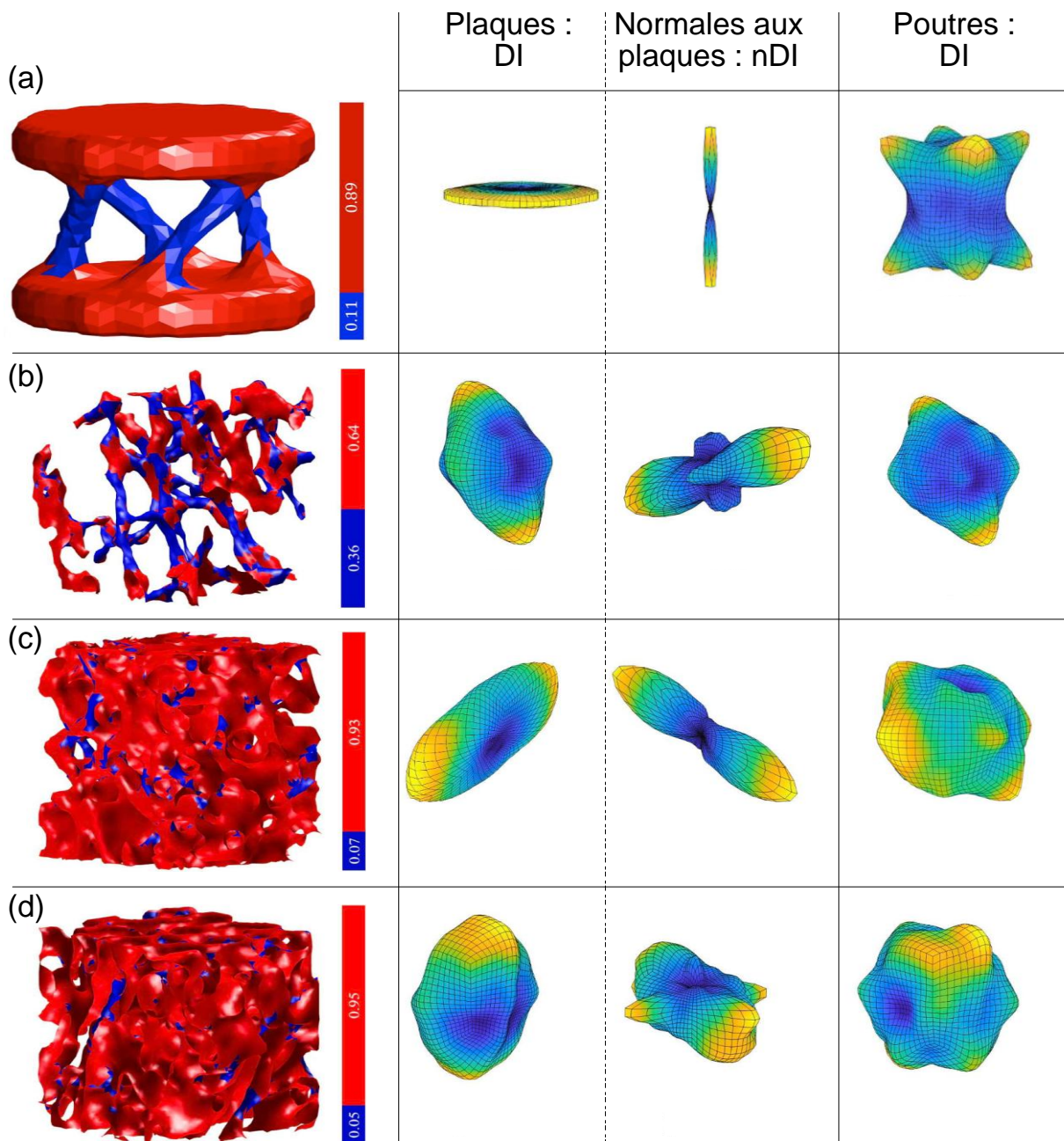


Fig. 5. Discrimination Plaques (en rouge) / poutres (en bleu) et diagrammes polaires de l'Intensité Directionnelles (DI) représentant un indicateur de l'anisotropie de la microstructure. (a) application sur une microstructure académique et (b)(c)(d) appliqué sur des microstructures d'os trabéculaires de têtes fémorales de bœuf.

## 6. Conclusion et perspectives

Les deux outils présentés exploitent le format de donnée des géométries issues de tomographies décrites par une enveloppe extérieure discrétisée par des triangles. Les temps de calculs sont suffisamment courts pour que des calculs multiples sur un ensemble de VER différents soient réalisés. Il a fallu de l'ordre de 30 s pour analyser 127 VER sur un ordinateur portable M2 Pro. Les tailles de mailles peuvent être assez grandes par rapport aux diamètres. Dans les exemples traités, des structures modèles régulières ont été utilisées avec un périmètre de poutre représenté par huit triangles adjacents. Toutefois, de ce cas, pour éviter des artéfacts de discrétisation, une interpolation des normales est réalisée pour l'intégration sur chaque triangle [10].

Le lien entre la description géométrique et les propriétés mécaniques est une suite importante. Les mécanismes de rupture sont propres à chaque type de composant (plaque ou poutres) et l'objectif est de construire des critères de rupture spécifiques à chaque type. Mais avant de construire ce modèle de comportement macroscopique, ces indicateurs ont été utilisés pour construire un générateur de microstructure plus fidèle mais tenant compte de l'anisotropie. La partie mécanique est alors réalisée sur les structures générées discrètes et calculées via des méthodes d'éléments discrets [8]. Cette démarche permet de sortir des statistiques de comportement plus pertinentes dans le cas de la biomécanique.

Les applications envisagées sont sur la qualification des mousses métalliques ou céramiques et l'analyse des distributions de charges de fibres coupées dans une matrice thermoplastique suite à un procédé d'injection.

## 7. Bibliographie

- [1] J. Wolff, "Das Gesetz der Transformation der Knochen. Dtsch med Wochenschr" 19, 1222–1224, 1893
- [2] S. Cowin. "Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium". pp 83-88. 1986
- [3] M. Heller, G. Bergmann, J.-P. Kassi, L. Claes, N. Haas, and G. Duda. "Determination of muscle loading at the hip joint for use in pre-clinical testing." *Journal of biomechanics*, 38(5), pp 1155–1163, 2005.
- [4] R. Allena, C. Cluzel. "Computational implementation of nonuniform orthotropic directions in the femoral diaphysis based on cortical bone microstructure to build a constitutive model." *Mathematics and Mechanics of Complex Systems* 9.1, pp 33-58, 2021
- [5] R. Rieger, "Modélisation mécano-biologique par éléments finis de l'os trabéculaire : des activités cellulaires au remodelage osseux". Thèse de doctorat l'Université d'Orléans, pp 8-31, 2011.
- [6] T. O. R. Hildebrand, and P. Rüegsegger. "Quantification of bone microarchitecture with the structure model index." *Computer Methods in Biomechanics and Bio Medical Engineering* 1.1, pp 15-23. 1997
- [7] P. K. Zysset. A review of morphology–elasticity relationships in human trabecular bone: theories and experiments. *Journal of biomechanics*, 36(10):1469–1485, 2003.
- [8] P. Hammer, 2022. *Marching Cubes*, MATLAB Central File Exchange.
- [9] Y. Ben Shabat, A. Fischer, 2015. "Design of Porous Micro-Structures Using Curvature Analysis for Additive-Manufacturing." *Procedia CIRP* 36, 279–284.
- [10] N. Rogalski, "Modèles topologiques et mécaniques pour l'étude du comportement anisotrope de l'os trabéculaire". Thèse de doctorat. HESAM Université. 2023.