



HAL
open science

Modélisation numérique par une approche micromécanique du comportement de mousses solides alimentaires

Mohamed Chiad, Wei-Dong Lian, Sofiane Guessasma, Grégory Legrain, Guy Della Valle, Patrice Cartraud

► **To cite this version:**

Mohamed Chiad, Wei-Dong Lian, Sofiane Guessasma, Grégory Legrain, Guy Della Valle, et al.. Modélisation numérique par une approche micromécanique du comportement de mousses solides alimentaires. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, LMT, May 2009, Giens, France. hal-01400591

HAL Id: hal-01400591

<https://hal.science/hal-01400591>

Submitted on 22 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation numérique par une approche micromécanique du comportement de mousses solides alimentaires

M. Chiad¹, W-D. Lian², S. Guessasma¹, G. Legrain², G. Della Valle¹, P. Cartraud²

¹ INRA, UR 1268 Biopolymères, Interaction et Assemblages (BIA)
Rue de la géraudière, 44316 Nantes
{chiad,guessasma,dellaval}@nantes.inra.fr

² GeM, Institut de recherches en Génie Civil et Mécanique UMR CNRS 6183
B.P. 92101, 44321 Nantes
{Wei-Dong.Lian, Gregory.Legrain, Patrice.Cartraud}@ec-nantes.fr

Résumé – L'élasticité des extrudés à base d'amidons est déterminée par une approche éléments finis. La structure alvéolaire de ces produits est caractérisée par tomographie RX. Le calcul éléments finis réalisé suivants deux démarches (conversion voxel/élément, méthode X-FEM) montre une influence importante de la porosité sur le module d'élasticité. Pour des taux de porosité similaires, les calculs montrent également une dispersion de cette propriété due à l'influence de l'architecture cellulaire.

Mots clés – Extrudés à base d'amidon, Eléments Finis, Module d'élasticité.

1 Introduction

Les propriétés mécaniques des produits alimentaires sont essentielles pour leur perception sensorielle et leur devenir nutritionnel. C'est particulièrement le cas de mousses solides telles que les produits céréaliers (à base d'amidon) extrudés. Une démarche de type micromécanique numérique est proposée dans cette étude, afin de mieux comprendre la relation entre la microstructure des extrudés et leur comportement macroscopique. La caractérisation de leur microstructure est réalisée par analyse d'images 3D obtenues par micro-tomographie RX (ESRF-Grenoble). Pour mieux analyser l'implication de l'architecture cellulaire sur le module d'élasticité des extrudés, une analyse par Eléments Finis (EF) est réalisée suivant deux approches. Tout d'abord à partir d'une conversion image/maillage, qui a l'avantage d'être automatique car associant un élément fini à chaque voxel ou à un groupe de voxels, mais qui a l'inconvénient de conduire à un modèle EF volumineux. Ensuite, la méthode X-FEM couplée avec les level-sets est utilisée, pour pallier au problème de taille du modèle EF. La méthode X-FEM permet en effet de s'affranchir des problèmes de maillage grâce à l'introduction de la discontinuité constituée par l'interface matériau à l'intérieur des EF.

2 Caractérisation expérimentale des mousses solides :

Les conditions d'élaboration des extrudés à base d'amidon ont permis d'obtenir des structures alvéolaires variées [1], dont les principales caractéristiques sont rapportées au Tableau 1. Les images du réseau tridimensionnel poreux des extrudés ont été obtenues par tomographie RX sur deux lignes de l'ESRF (ID19 et BM05, Grenoble) avec un faisceau

monochromatique de 12 keV. Les échantillons ont été positionnés de telle sorte que l'axe Z correspond à l'axe d'écoulement de la matière en sortie d'extrudeur. Les images ont été acquises avec une résolution $d = 10, 15$ et $40 \mu\text{m}$ (Tableau 1) dans un cylindre de 1024 pixels de hauteur et de diamètre.

Le traitement des images 3D obtenues est décrit en détail dans les travaux précédents [2]. La figure 1 montre un exemple de structure 3D révélant un réseau irrégulier de cellules avec des parois fines.

#	Caractéristiques structurales					
	NX*NY*NZ	d (μm)	ρ (-)	TC (mm)	TP (μm)	Es (GPa)
A46	450*200*250	40	0.20	3.3	624	3.8
A53	415*440*200	15	0.15	0.74	80	3.8
A71	500*160*250	10	0.18	1.98	313	3.0
B34	160*370*450	10	0.26	0.67	147	6.5
C122	125*300*300	10	0.34	0.86	208	5.8
D41	800*130*270	40	0.24	3.36	595	6.0

Tableau 1 – Caractéristiques structurales des extrudés à base d'amidon [1].

La proportion de vide est égale à $1 - 100 \cdot \rho$, où ρ est la densité relative, rapport entre la masse volumique de la mousse et celle de la phase solide. Par analyse d'images, cette quantité peut être déterminée sous la forme en prenant la densité de la phase solide comme unité de mesure :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{NX \cdot NY \cdot NZ} \delta_i}{(NX \cdot NY \cdot NZ)} \quad (1)$$

où NX, NY et NZ sont les dimensions de l'échantillon en voxel, δ_i est une fonction binaire qui vaut 1 si le voxel i correspond à la phase solide. Les valeurs de densité relative varient entre 0.11 et 0.35 (Tableau 1). Par granulométrie avec un élément structurant octaédrique, les distributions de taille d'alvéoles et de parois ont été déterminées et leur moyenne en volume, TC, TP, rapportées dans le tableau 1.

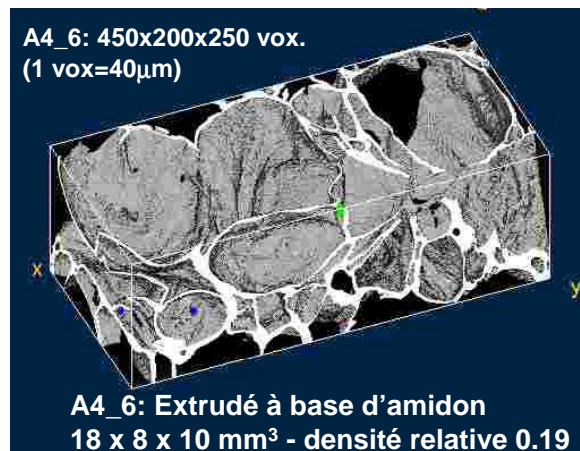


Figure 1 – Structure 3D d'un extrudé d'amidon (A46) révélée par tomographie RX.

3 Modélisation

3.1 Méthode conversion voxel /élément

Les structures 3D ont été importées dans un modèle éléments finis par conversion voxel/élément. Le maillage régulier qui en découle a l'inconvénient de produire des modèles volumineux mais il transfère intégralement l'information issue des images. Le calcul est réalisé avec le logiciel ANSYS et des EF volumiques à 8 nœuds. La phase dense est un matériau élastique isotrope dont le module d'élasticité, variable selon les conditions d'élaboration, a été déterminé par des essais de flexion sur des échantillons macroscopiques du matériau dense [2], et les valeurs E_s (module d'élasticité de la phase solide pour une teneur en eau résiduelle de 9%) sont rapportées au Tableau 1. Le coefficient de Poisson est supposé constant autour de 0.35.

Les résolutions initiales des images sont élevées. Elles doivent être réduites pour pouvoir réaliser des calculs sur des machines standards de sorte que le nombre d'éléments ne dépasse pas 5×10^5 éléments. L'influence de la réduction de la résolution est étudiée en définissant un facteur de résolution f . Ce facteur se définit comme suit :

$$f = (V_1/V_2)^{1/3} \quad (2)$$

où V_1 est le volume correspondant à une résolution donnée, V_2 est le volume correspondant à la sous-résolution. La Figure 2a montre le maillage obtenu pour des valeurs de f croissantes. Un des inconvénients de la conversion voxel/EF, à savoir l'obtention de frontières crénelées apparaît bien sur ces images, le résultat étant d'autant plus mauvais que f est grand.

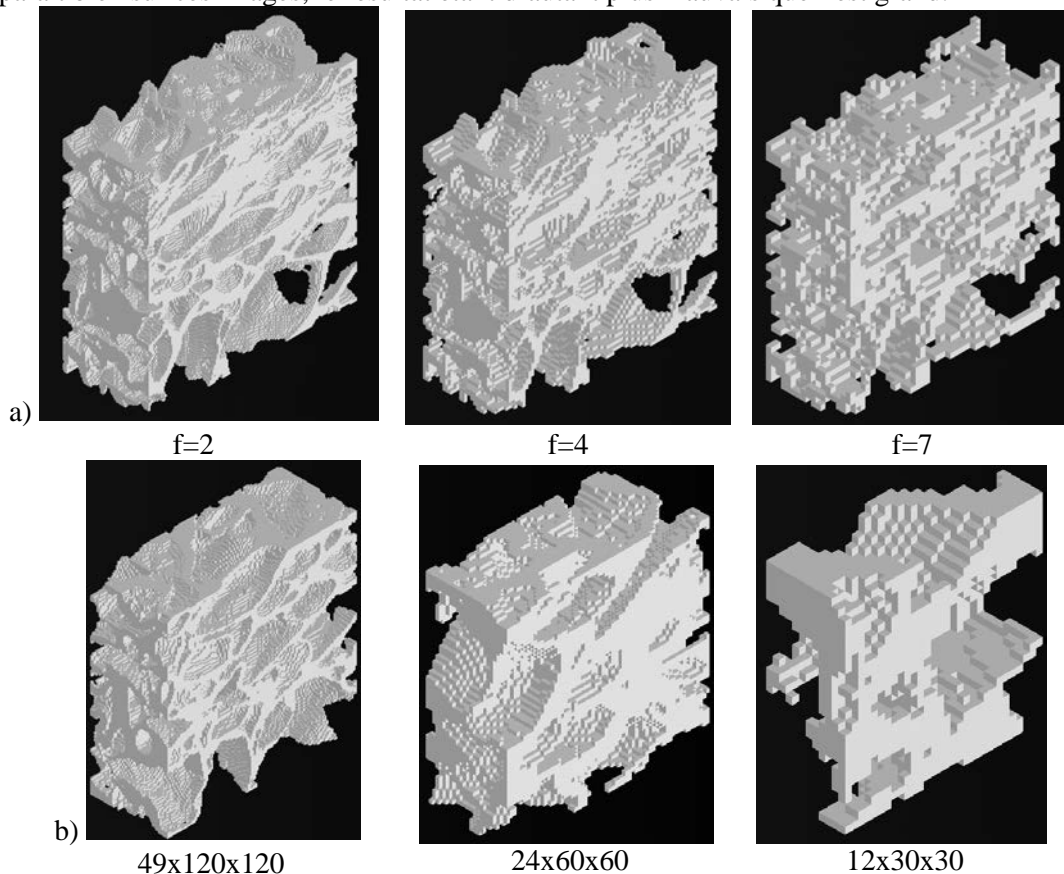


Figure 2 – Maillages 3D en fonction (a) du facteur f et (b) de la taille des volumes sélectionnés appliqués à la structure C122 ($\rho=0,34$).

Pour déterminer la taille du VER, des sous-volumes de taille décroissante sont sélectionnés d'une manière aléatoire dans le volume initial [3]. Afin de préserver la forme initiale du volume,

un rapport constant est fixé entre les dimensions du volume initial et celles du sous-volume généré. Dix structures sont générées par niveau de taille afin de conserver la représentativité des sous-volumes. La figure 2b illustre ce principe dans le cas de la structure C122.

Pour chaque structure, les caractéristiques homogénéisées sont déterminées selon l'approche en déformation de la méthode de Hill-Mandel [4]. La loi de comportement homogénéisée obtenue est orthotrope, la direction Z étant une direction d'orthotropie. Ceci permet de définir trois modules d'Young effectifs E_X , E_Y et E_Z .

3.2 Méthode X-FEM

L'objectif ici est de développer une méthode qui, comme la précédente, soit très facile à mettre en œuvre, mais dans laquelle le lien entre la géométrie et le maillage soit moins rigide. Pour ce faire, la méthode X-FEM couplée aux techniques de level-sets est utilisée. Ainsi, la géométrie est décrite par des level-sets, dont les valeurs sont obtenues à l'issue de la segmentation de l'image. Par ailleurs, la méthode X-FEM permet d'avoir un maillage structuré, les éléments traversés par l'interface matériau étant enrichis de façon à prendre en compte cette discontinuité. Cette approche a déjà été présentée dans [5]. Dernièrement, elle a été améliorée en proposant un maillage structuré mais dont la taille est adaptée à la précision requise pour décrire la géométrie, avec une méthode de type octree. En conséquence, les EF ont une taille d'un pixel au voisinage de l'interface matériau, et leur taille augmente avec la distance à l'interface. Un exemple illustrant ce principe de maillage est présenté dans le cas 2D figure 3.

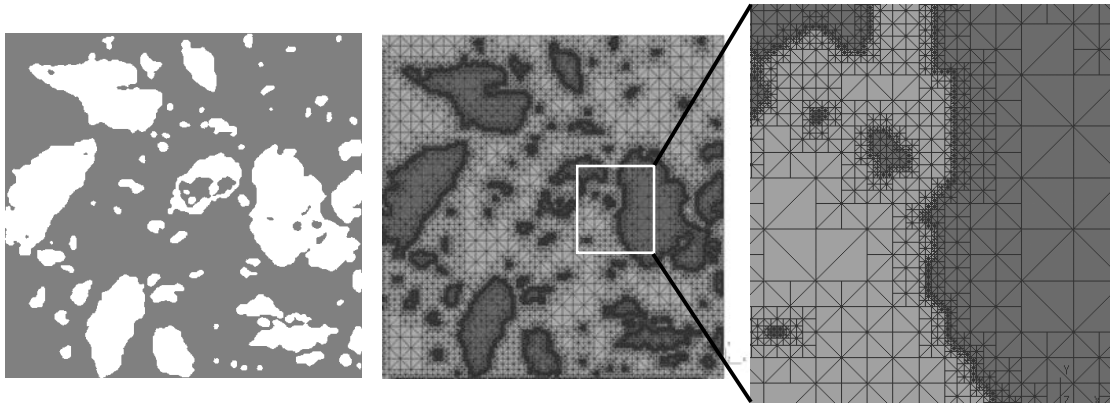


Figure 3 – maillage structuré de type quadtree adaptatif réalisé à partir d'une image 2D.

Grâce à cette approche, la précision sur les détails géométriques est la même que celle de l'image initiale, le modèle comportant des éléments dont la taille est supérieure au pixel. Ceci permet ainsi de diminuer le temps de calcul par rapport à un maillage uniforme de la taille du pixel.

4 Résultats et discussion

Seuls des résultats obtenus à partir de la méthode de conversion voxel/élément fini sont présentés ci-après. La Figure 4a montre l'évolution des modules d'Young effectifs dans les trois directions ainsi que la densité relative pour un facteur de résolution f variant entre 2 et 7, pour la structure C122. Dans cet intervalle, la densité relative de la structure C122 varie d'environ 3% autour de 0,336. La réponse élastique dans les trois directions est significativement différente (écart de l'ordre de 41%) pour un module relatif moyen de 0.1. Ceci suggère que la réponse élastique est anisotrope. Le module E_Z suit la même tendance que la densité relative ce qui indique que la proportion de parois dans cette direction est modifiée par f .

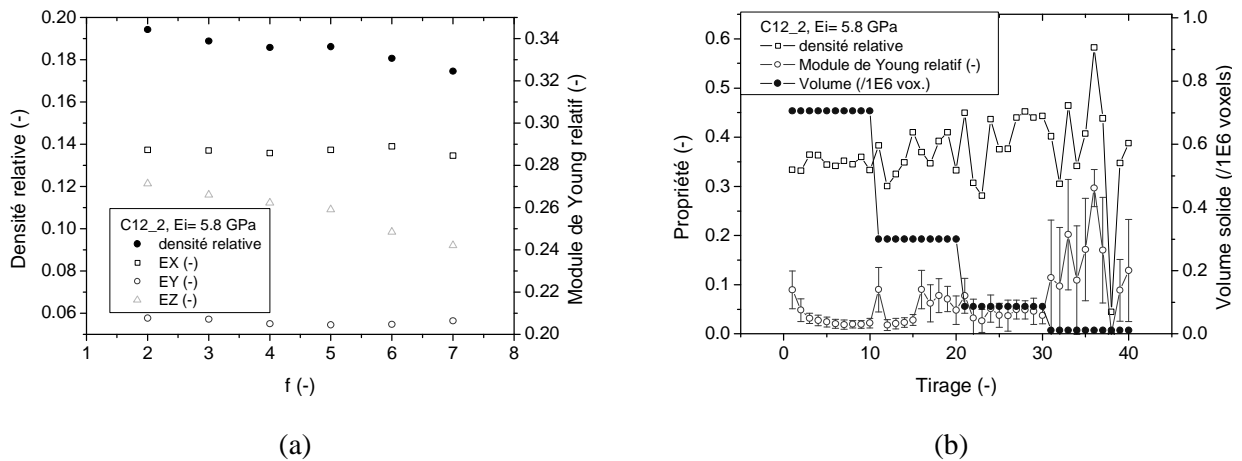


Figure 4 – (a) Evolution de la densité relative et du module effectif moyen en fonction du facteur de résolution (f) pour la structure C122. (b) Evolution de la densité relative et du module effectif moyen en fonction du tirage de solides de taille décroissante (structure C122).

Lorsque la taille des sous-volumes décroît jusqu'à des valeurs faibles devant la taille moyenne des cellules, la variation de la densité relative devient significative (Figure 4b). En effet, pour la résolution sélectionnée ($60 \times 150 \times 150$), la taille des solides correspondant aux tirages entre 30 et 40 est de 0,72 mm, valeur inférieure à la taille moyenne des cellules pour la structure C122 ($TC=0,86$ mm). La variation du module de Young est liée à celle de la densité relative, notamment pour les tirages >30 .

La moyenne du module de Young dans les trois directions pour chaque volume est exploitée pour déterminer la taille du VER en fonction des conditions étudiées (Figure 5a). En général, la valeur du module de Young est stable pour des volumes $> 0,5$, sauf pour A46, pour lequel l'instabilité n'est pas liée à la variabilité de la densité relative, mais plutôt à la structure elle-même. Pour les cas C122 et A46, les valeurs de modules correspondant au volume initial sont utilisées afin de construire la corrélation entre le module effectif et la densité relative (Figure 5b). Cette corrélation est très bien approchée par une loi de type Gibson–Ashby [6] avec un très bon facteur de corrélation. L'exposant $n=2,5$ suggère un mécanisme de flexion prépondérant par rapport à la déformation uniaxiale. La même démarche appliquée à des structures virtuelles montre que la dispersion des valeurs de module à même densité relative peut également être imputée à l'hétérogénéité de la structure alvéolaire [7].

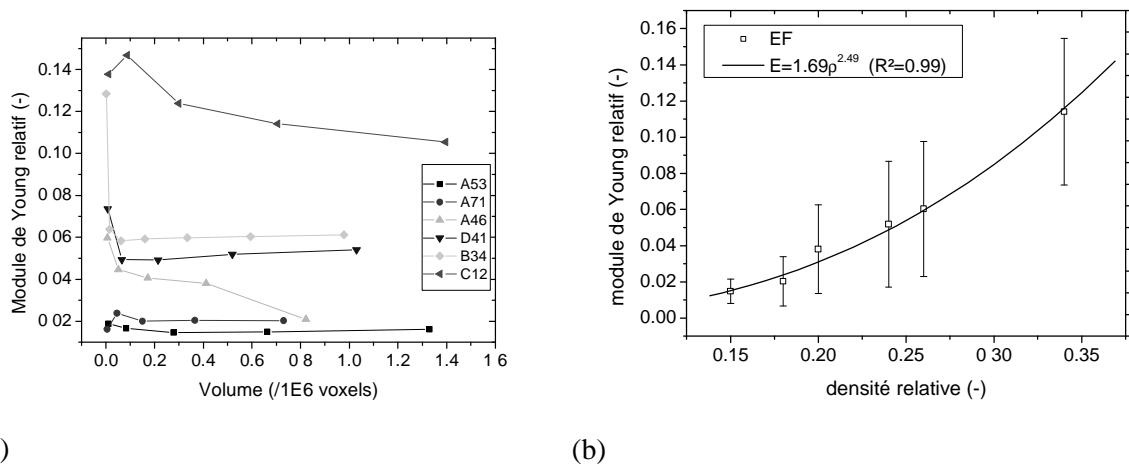


Figure 5 – (a) Détermination du VER et (b) Evolution du module de Young en fonction de la densité relative pour les extrudés étudiés.

5 Conclusions

La détermination des propriétés élastiques de mousses solides à base de biopolymères par calcul éléments finis est délicate en raison de la complexité de leur structure alvéolaire. Les résultats présentés ici ont été obtenus à partir d'une méthode dans laquelle le maillage est généré en associant un EF à chaque voxel. Pour limiter la taille du modèle, toutefois, il faut dégrader la résolution de l'image initiale.

L'étude du module d'élasticité effectif des extrudés à base de biopolymères révèle que ces structures sont caractérisées par une forte anisotropie qui se manifeste par un écart entre les modules effectifs calculés suivant les directions orthogonales du solide.

A partir de la détermination du VER, le module effectif est bien corrélé à la densité relative suivant une loi de type Gibson-Ashby. Cette dernière suggère que le mécanisme de déformation par flexion est le mécanisme le plus dominant.

Des travaux sont en cours pour consolider ces résultats, en analysant les microstructures avec la méthode X-FEM et level-sets, qui permet une meilleure approximation de la géométrie.

6 Références

- [1] P. Babin. Matériaux alvéolaires à base de bio-polymères: structure et propriétés mécaniques. Thèse de doctorat, Grenoble: INPG, 153, 2005.
- [2] P. Babin, G. Della Valle, R. Dendievel, D. Lourdin, L. Salvo. X-ray tomography study of the cellular structure of extruded starches and its relations with expansion phenomenon and foam mechanical properties. *Carbohydrate Polymers* 68, 329-340, 2007.
- [3] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, D. Jeulin. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach, *International Journal of Solids and Structures*, 40, 3647-3679, 2003.
- [4] P. M. Suquet. "Elements of Homogenization for Inelastic Solid Mechanics", in *Lecture Notes in Physics*, Sanchez-Palencia E. and A. Zaoui, Eds. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 194-275, 1987.
- [5] I. Ionescu, N. Moës, P. Cartraud, N. Chevaugeon, M. Béringhier. Application de X-FEM et des level-sets à l'homogénéisation de matériaux aléatoires caractérisés par imagerie numérique. In, actes du 8ème colloque national en calcul de structures, 2007
- [6] L.J. Gibson, M.F. Ashby. *Cellular solids*. Second ed. Cambridge: pergamon Press Ltd; 510, 1997.
- [7] S. Guessasma, P. Babin, G. Della Valle, R. Dendievel. Relating cellular structure of open solid food foams to their Young's modulus : finite element calculation. *Int. J. Solids Struct.*, 45, 2881-2896, 2008.