



**HAL**  
open science

## Caractérisation microstructurale et densification locale d'isolant fibreux cellulosiques sollicités en compression

Christine C. Delisee, Eric Badel, Jérôme Lux, Jérôme J. Malvestio

### ► To cite this version:

Christine C. Delisee, Eric Badel, Jérôme Lux, Jérôme J. Malvestio. Caractérisation microstructurale et densification locale d'isolant fibreux cellulosiques sollicités en compression. 26. Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC), Jun 2008, Nancy, France. 8 p. hal-02821230

**HAL Id: hal-02821230**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02821230>**

Submitted on 6 Jun 2020

**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.

---

# Caractérisation microstructurale 3D et densification locale d'isolants fibreux cellulosiques sollicités en compression

Christine Delisée<sup>1</sup>, Eric Badel<sup>2</sup>, Jérôme Lux<sup>3</sup>, Jérôme Malvestio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité Sciences du Bois et des Biopolymères US2B - UMR5103 - 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex (delisee@us2b.pierroton.inra.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois LERMAB - UMR1093 -14, rue Girardet, 54506 Nancy

<sup>3</sup> Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert Appliqués LEPTIAB - EA2119 - Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle cedex 1

---

*RÉSUMÉ.* On s'intéresse à des isolants thermiques à base de fibres de bois utilisés dans le bâtiment, de très forte porosité, élaborés par un procédé textile non tissé. Les propriétés thermiques ont fait l'objet des premières études et les propriétés mécaniques, intervenant lors du transport et de la manipulation, font l'objet de ce travail. Nous avons suivi in-situ, grâce à la microtomographie X, l'état de déformation interne d'un panneau d'isolation soumis à une sollicitation de compression transverse (33%). Le comportement particulier mis en lumière par l'accès à la déformation locale est relié à la très faible densité du matériau. En particulier, les fibres de bois ne sont pas comprimées et la déformation macroscopique du matériau n'engendre que leur réorganisation spatiale. Ces résultats sont mis en relation avec des caractéristiques morphologiques de structures évaluées par analyse d'image 3D.

*ABSTRACT.* In this work, we focus on a thermal insulating panel made of wood fibres. The making process is a non-woven fabric process that generates a high porosity and a very low-density material. Thermal properties were first investigated. This paper deals with mechanical properties that are involved in the production line, transport and handling in the construction site. An insulating panel was compressed (33%) and we followed in-situ its internal deformation using X-ray microtomography. The results enlighten a special behavior that is linked to the low-density structure of the panel. In particular, the fibres are not compressed and the macroscopic deformation of the sample generates only a new organisation of the fibres in the panel. These results are confirmed by morphological measurements that were performed by 3D image analysis.

*MOTS-CLÉS :* bois – compression – densification locale – fibres – isolation thermique – microstructure – microtomographie rayons X – morphologie.

*KEYWORDS:* compression – fibres – local densification – microstructure – morphology – thermal insulation – wood – X-ray microtomography

---

## 1. Introduction

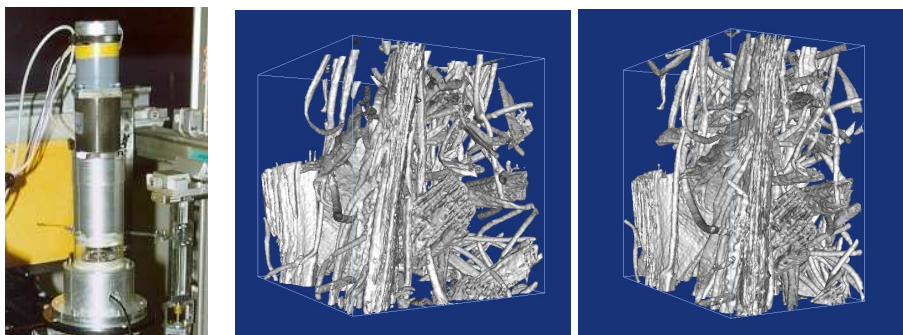
L'utilisation des fibres végétales dans les matériaux destinés à l'isolation thermo-acoustique des bâtiments, bien qu'encore marginale, suscite un intérêt croissant dans une démarche de qualité environnementale (label HQE). C'est par l'innovation que l'on pourra accroître les parts de marché de ces matériaux ; la maîtrise de leur architecture constitue un point d'entrée essentiel, dans la mesure où un grand nombre de propriétés (de transport, mais aussi mécaniques, acoustiques ou optiques) sont en particulier contrôlées par la microstructure [LUX 06], [FAE 03]. En fonction des domaines d'applications de ces matériaux (isolation thermique ou acoustique, panneau d'agencement...), on rencontre deux types de procédés d'élaboration : l'un s'appuyant plutôt sur des techniques inspirées de l'industrie papetière, l'autre constituant un héritage direct de l'industrie du panneau à base de bois (procédé par thermo-compression de mats de fibres préencollées). Bien que ces techniques d'élaboration soient fondamentalement différentes (nature des liaisons, dimensions des fibres...), la principale limitation technologique reste la même, à savoir, les réseaux fibreux constitutifs ne présentent jamais une réelle architecture 3D. Cette limitation a plusieurs conséquences directes : la cohésion interne des panneaux demeure principalement liée à leur densité apparente, de même, leur épaisseur se trouve de fait limitée. Ainsi, dans un contexte où l'industrie cherche à diversifier les potentialités d'applications de ces matériaux, l'élaboration de réseaux présentant une réelle architecture 3D se dégage comme l'un des axes de recherche porteurs.

Le matériau étudié ici est un prototype réalisé dans le cadre d'un projet industriel soutenu par l'ADEME et l'industriel ISOROY. Il s'agit d'un matériau destiné à l'isolation thermique sous toiture, de très forte porosité (> à 95%), constitué de 75% en masse de fibres de pin maritime et de 25% de fibres textiles bi-composantes (gaine polyester PES et âme Co-Polyester Co-PES) qui assurent la cohésion du matériau. L'objectif était d'étudier la faisabilité d'isolants naturels issus de la ressource locale (fibres de pin maritime), présentant une structure 3D fortement enchevêtrée et pouvant ainsi atteindre de fortes épaisseurs (épaisseurs > à 6 cm) sans contrecollage. L'architecture complexe et anisotrope du réseau des fibres (Figure 1) est liée au procédé d'élaboration : ici un procédé textile non-tissé. Lors d'études préalables [LUX 06], [FAE 03], nous nous sommes intéressés aux relations entre microstructure et propriétés thermiques, dans un souci d'optimisation du procédé d'élaboration. Après fabrication, lors des phases de stockage, de transport, de mise en œuvre et d'utilisation en service, ces matériaux, de forte porosité, sont soumis à des sollicitations mécaniques induisant des modifications de structure et donc de propriétés. Un travail exploratoire de suivi des déformations sous compression, en relation avec les modifications de structure des réseaux et des fibres, est réalisé ici à partir d'images 3D acquises par microtomographie X à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility Grenoble) à différents taux de compression. Les essais mécaniques ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction-compression spécifiquement développée au laboratoire GEMPPM [BUF 99] pour permettre l'acquisition de scans tomographiques. Des outils issus de la

morphologie mathématique [MAT 67], [SER 82] sont utilisés pour traiter les images en niveaux de gris obtenues et en extraire des paramètres morphologiques et topologiques en 3D. Afin d'identifier le processus local de compression du matériau, le concept de base que nous avons choisi d'adopter pour ce matériau discontinu est celui de la conservation de la masse [BAD 03]. Les résultats obtenus sont mis en correspondance avec le protocole expérimental et les analyses de structure réalisées par analyse d'image, permettant de mieux comprendre le processus de réorganisation des fibres au sein du matériau en liaison avec sa structure initiale.

## 2. Mesures expérimentales

Les essais mécaniques ont été réalisés sous imagerie X (Figure 2) sur la ligne ID19 de l'ESRF. L'échantillon testé est un cylindre de diamètre et hauteur initiale égaux à environ 10mm. Il a été découpé sur une des faces du panneau (d'épaisseur totale 60mm) et placé dans un tube de PMMA afin de garantir un déplacement macroscopique 1D. Deux scans tomographiques ont été réalisés, avec une résolution spatiale de 4,91  $\mu\text{m}$ , à deux états de compression, appelés "état initial" et "état comprimé" (Figure 3). La déformation macroscopique expérimentale entre les deux états est estimée à 32,8%. Des outils issus de la morphologie mathématique sont ensuite utilisés pour traiter les images en niveaux de gris obtenues et en extraire des paramètres morphologiques 3D [MAT 67], [COS 85].



**Figure 1.** *Essais de compression sous imagerie X*

**Figure 2.** *Rendus volumiques d'un sous-volume de l'échantillon aux états "initial" (à gauche) et "comprimé" (à droite)*

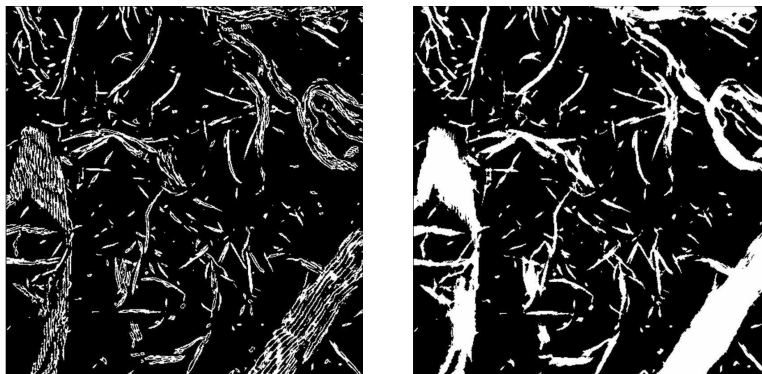
## 3. Caractérisation morphologique 3D aux deux taux de compression

Pour éviter les effets de bord liés à la découpe du matériau, des volumes de dimensions réduites sont extraits dans le cœur des images. Les volumes traités ont pour dimensions  $1024^2 \times 1360$  pixels<sup>3</sup> ( $5^2 \times 6,7$  mm<sup>3</sup>) pour l'état initial et  $1024^2 \times$

973 pixels<sup>3</sup> (5<sup>2</sup> × 4,8 mm<sup>3</sup>) pour l'état comprimé. Ces dimensions sont supérieures à la taille d'un volume élémentaire représentatif du matériau, estimé pour certaines propriétés (porosités, taille des fibres et des pores, orientations) dans le cadre de travaux antérieurs [LUX 05]. Après filtrage et nettoyage des images pour en éliminer le bruit, les phases fibreuse et poreuse sont séparées par seuillage (Figure 3). Afin de mettre en évidence les modifications structurales induites par une compression du matelas fibreux, des mesures morphologiques sont réalisées aux deux taux de compression : porosités, orientations, taille des pores et des fibres.

### 3.1. Porosités

On s'intéresse, dans le cas des matériaux à base de fibres de bois, à plusieurs types de porosités. La porosité totale du matériau est obtenue à partir de l'image binaire nettoyée, en calculant la fraction volumique de l'air contenu dans un volume donné. Afin d'accéder à la porosité interne des fibres de bois (lumen), connectée à l'espace poral inter-fibres, des opérations morphologiques 3D [LUX 06] sont mises en œuvre afin de reboucher les fibres tout en préservant leurs contours (Figure 3). La porosité externe, ou fraction volumique des pores externes aux fibres, est mesurée également. Les porosités totale et externe varient respectivement de 92,4% et 87,8% pour l'état initial à 88,6% et 81,8% pour l'état comprimé, alors que la porosité interne reste constante (37,1% et 37,4%), indiquant que la morphologie des fibres et bûchettes de bois n'est pas affectée par la sollicitation de compression.

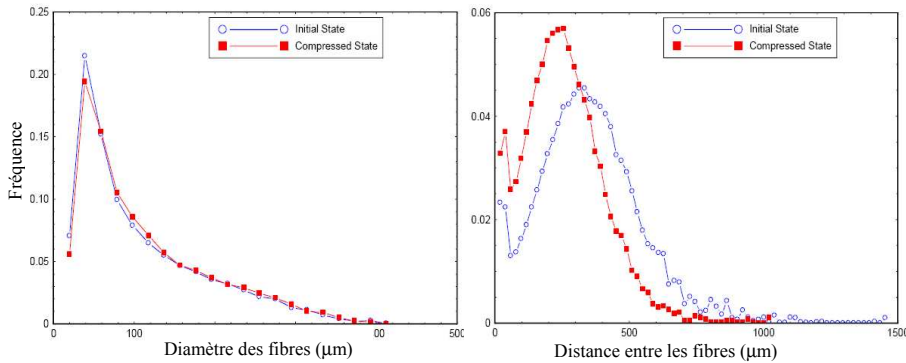


**Figure 3 :** Images binaires d'une coupe parallèle aux faces avant rebouchage (à gauche) et après rebouchage (à droite) des fibres. Taille 5 × 5 mm<sup>2</sup>.

### 3.2. Distributions des tailles des pores et des fibres

Afin d'accéder aux tailles des pores et des fibres aux deux taux de compression, on réalise respectivement sur les ensembles des pores et des fibres après rebouchage des *ouvertures morphologiques* [MAT 67] par un octaèdre de taille croissante (Figure 4). Les courbes granulométriques obtenues montrent que, si la taille des fibres reste constante (c'est donc que les petits pores internes ne sont pas modifiés),

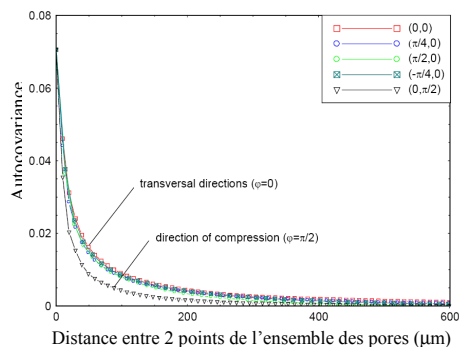
les distances inter-fibres (ou taille des gros pores autour des fibres rebouchées) sont réduites dans la compression.



**Figure 4 :** Distributions des tailles des fibres (à gauche) et des tailles des pores (ou distances inter-fibres, à droite)

### 3.3. Orientations des fibres

Des covariogrammes, mesurés sur l'ensemble des pores dans les 13 directions de l'espace définies par la 26-connectivité, permettent de caractériser l'anisotropie du matériau. Les courbes obtenues dans les 4 directions parallèles aux faces sont confondues et la courbe correspondant à la direction parallèle à l'axe de compression est située très en dessous de ces courbes (Figure 5), montrant que les fibres ont une orientation privilégiée dans des plans parallèles à l'axe de compression et sont orientées de manière aléatoire dans ces mêmes plans. Ces covariogrammes, mesurés pour l'état initial et pour l'état comprimé, ne permettent pas toutefois de mettre en évidence de différence notable des orientations à ce taux de compression.



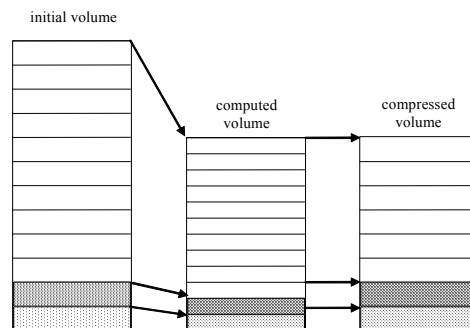
**Figure 5.** Covariogrammes mesurés ici dans l'état 'initial'

#### 4. Profil des taux de compression locaux

Afin d'identifier le processus local de compression du matériau, le concept de base que nous avons choisi d'adopter pour ce matériau discontinu est celui de la conservation de la masse [BAD 03]. Nous avons émis l'hypothèse que, dans ce milieu particulier, dont l'essentiel du volume est occupé par de l'air, la déformation macroscopique de l'échantillon ne se fait, à l'échelle microscopique, que par le déplacement des points matériels constituant la phase solide du bois (parois des fibres). Ainsi, cette phase solide n'est pas comprimée mais les fibres se réorganisent simplement au sein du volume particulièrement poreux. La densité dont nous souhaitons étudier l'évolution est donc une densité de points matériels, correspondant, pour un sous-volume donné, au nombre de voxels de la phase solide. Le processus utilisé repose sur la conservation du nombre de points matériels entre l'état initial et l'état comprimé. On calcule, à partir de la tranche 1 située contre le plateau de compression, pour chaque tranche ( $i$ ) de l'état initial d'épaisseur 1 voxel, l'épaisseur de la tranche correspondante dans l'état comprimé ayant le même nombre de points matériels (Figure 6). La déformation en compression de la tranche ( $i$ ) est simplement donnée par :

$$\varepsilon(i) = \frac{e_{new}(i) - e_{init}(i)}{e_{init}(i)} \quad [1]$$

avec  $e_{new}$  la nouvelle épaisseur calculée dans l'échantillon comprimé et  $e_{init}$  l'épaisseur initiale de la tranche dans l'état initial. Le processus est réitéré le long de l'axe de compression jusqu'au balayage complet de l'échantillon.

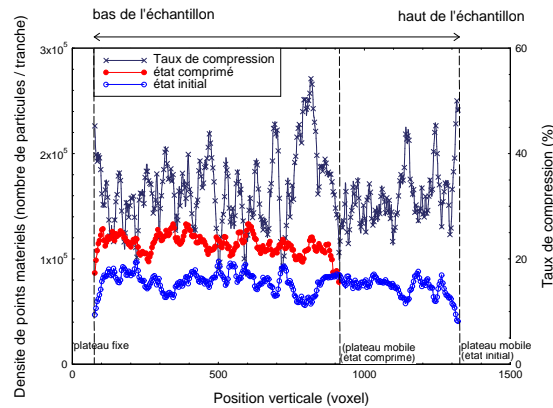


**Figure 6.** Densification locale par tranche

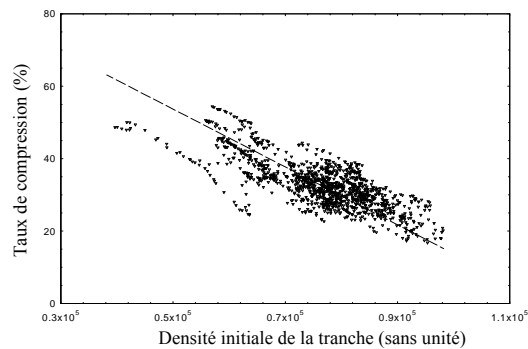
On obtient finalement le profil de compression locale selon l'axe perpendiculaire aux faces (Figure 7). Le taux de compression macroscopique calculé est égal à 32,8%, correspondant à la valeur expérimentale précédemment estimée.

L'augmentation du taux de compression local lorsque la densité initiale diminue est mise en évidence dans la figure 8, indiquant que les particules se déplacent, sous la sollicitation de compression, préférentiellement vers les zones de faible densité. La mise en correspondance de ces résultats avec les analyses de structure réalisées

par analyse d'image permet de mieux comprendre le processus de réorganisation des fibres au sein du matériau en liaison avec sa structure initiale. En particulier, la très forte porosité et le mode de liaison des fibres jouent un rôle primordial dans ce comportement mécanique en compression.



**Figure 7.** Profil de compression locale selon l'axe de compression



**Figure 8.** Relation entre la densité initiale de points matériels et le taux de compression

## 5. Conclusion

Des images microtomographiques de matériaux isolants à base de fibres de bois, de densité très faible, ont été réalisées à différents taux de compression, afin de mettre en évidence les modifications de structure et les déformations locales induites par la sollicitation. Le processus local de compression du matériau est identifié en utilisant le principe de conservation de la masse entre l'état initial et l'état comprimé, avec l'hypothèse d'un déplacement 1D des particules solides suivant l'axe de compression. De plus, dans ce milieu discontinu et essentiellement



composé d'air, la déformation macroscopique ne se fait que par le déplacement des points matériels constituant la phase solide du bois, sans densification intrinsèque de la matière fibreuse. Nous avons ainsi suivi l'évolution de la densité des points matériels, correspondant, pour un sous-volume donné, au nombre de voxels de la phase solide. Ces hypothèses sont validées par des mesures morphologiques réalisées sur les images : porosités, tailles des fibres et des pores et orientation. La porosité interne des fibres n'est pas affectée contrairement à la porosité externe aux fibres. La phase fibreuse n'est donc pas comprimée ; les fibres se réorganisent simplement au sein du volume, et plus particulièrement dans les zones de plus forte porosité. Ainsi, le protocole d'analyse proposé, basé sur la microstructure particulière du matériau (discontinuité du matériau, très basse densité) et le protocole expérimental donne des résultats en adéquation avec les mesures extraites des images et les mesures de déplacement réalisées lors de l'expérimentation. En perspectives, un traitement plus complet, de type corrélation d'images 3D, avec un suivi de point, est envisagé. De plus, des mesures morphologiques complémentaires, réalisées à partir d'une représentation simplifiée du réseau sous forme d'un squelette 3D et permettant de caractériser et suivre l'évolution des contacts entre les fibres (nombre, surface de contact, répartition dans l'espace), sont en cours de réalisation.

## 6. Bibliographie

- [BAD 03] BADEL E., LÉTANG J.M., BABOT D., « Quantitative microtomography : measurement of density distribution in glass wool and local evolution during a one-dimensional compressive load », vol. 14, 2003, p. 410-420.
- [BUF 99] BUFFIÈRE, J.Y., MAIRE E., CLOETENS P., LORMAND G., FOUGERES R., « Characterization of internal damage in a MMCp using X-ray synchrotron phase contrast microtomography », *Acta Materialia*, vol. 47(5), 1999, p. 1613-1625.
- [COS 85] CÔSTER M., CHERMANT J.L., *Précis d'analyse d'images*, Presses du CNRS, 1985.
- [FAE 05] FAESSEL M., DELISÉE C., BOS F., CASTÉRA P., « Modelling of random cellulosic fibrous networks based on X-ray tomography and image analysis », *Composites Science and Technology*, vol. 65, 2005, p. 1931-1940.
- [LUX 05] LUX J., Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2005.
- [LUX 06] LUX J., AHMADI A., GOBBÉ C., DELISÉE C., « Macroscopic thermal properties of real fibrous materials: Volume averaging method and 3D image analysis », *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 49, 2006, p. 1958-1973.
- [MAT 67] MATHERON G., *Eléments pour une théorie des milieux poreux*, Paris, Masson, 1967.
- [SER 82] SERRA, J., *Image analysis and Mathematical Morphology*, New-York, Academic Press, 1982.