



HAL
open science

Construction de maillages numériques à partir de micro-imagerie X : Rôle de la représentation pour le calcul des propriétés

Eric Badel, Patrick Perre

► **To cite this version:**

Eric Badel, Patrick Perre. Construction de maillages numériques à partir de micro-imagerie X : Rôle de la représentation pour le calcul des propriétés. Congrès de la Société Française d'Optique : Contrôle et Mesures Optiques pour l'Industrie, Nov 2006, Mulhouse, France. n. p., 2006. hal-02817032

HAL Id: hal-02817032

<https://hal.inrae.fr/hal-02817032>

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.

Construction de maillages numériques à partir de micro-imagerie X : Rôle de la représentation pour le calcul des propriétés.

Badel E., Perré P.

LERMAB-UMR INRA 1093, ENGREF 14, rue Girardet, 54042 Nancy Cedex, France
badel@nancy-engref.inra.fr, perre@nancy-engref.inra.fr

Résumé:

Le matériau bois montre des structures anatomiques particulièrement variées qui se traduisent par une grande variabilité de ses propriétés. Dans une approche cognitive, la modélisation de ses propriétés passe par une phase importante d'observation et de caractérisation qui permet de prendre en considération la structure réelle du matériau. A cette échelle, le facteur de forme et l'orientation des cellules selon la direction longitudinale permettent de faire l'hypothèse d'une structure et d'un comportement 2D. A partir d'images numériques obtenues par atténuation de rayons X, les contours de différentes plages de tissus sont vectorisés à l'aide d'un logiciel développé au LERMAB (MeshPore). Cette information sert de base à la réalisation de maillages par éléments finis triangulaires sur lesquels les calculs d'homogénéisation permettant la prédiction de propriétés de la structure hétérogène sont réalisés. Les influences du raffinement du maillage et de la taille du Volume Élémentaire Représentatif sont ici étudiés.

Mots clé : maillage, éléments finis, volume élémentaire représentatif, structure, représentation

1 Introduction

Le bois, de part la diversité de ses origines biologiques, comme de ses conditions de croissance, montre des structures anatomiques particulièrement variées. Ceci se traduit par une grande variabilité des propriétés du matériau d'ingénierie, caractéristique marquée en inter mais aussi en intra spécifique. Dans une approche cognitive, la modélisation de ses propriétés physiques passe donc par une phase importante d'observation et de caractérisation de la structure réelle du matériau. A cette échelle, le facteur de forme et l'orientation des cellules selon la direction longitudinale permettent de faire l'hypothèse d'une structure et d'un comportement 2D.

L'imagerie X est un outil d'observation intéressant permettant d'accéder à différents types d'information sur la structure des matériaux. Appliquée au bois de chêne, bois particulièrement hétérogène à l'échelle de l'accroissement annuel, nous utilisons les propriétés d'atténuation des tissus qui le composent afin de les différencier et d'obtenir une cartographie du plan d'organisation. Le dispositif d'imagerie X numérique que nous avons développé (Badel & Perré 2002), basée sur une source X micro-focus et une détection par caméra haute résolution à CCD refroidi, est particulièrement versatile et permet, dans le compromis, de choisir entre résolution spatiale et champ d'observation tout en maintenant une excellente qualité de rapport Signal / Bruit qui facilite une différenciation des différents tissus constitutifs.

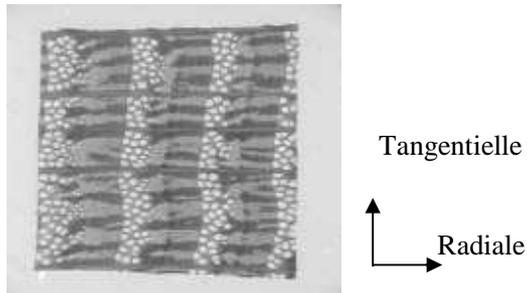


Figure 1 : Exemple d'imagerie par rayons X de la structure de bois de chêne. On distingue 3 accroissements annuels constitués chacun de gros vaisseaux (environ 300 μ m de diamètre), de plages de fibres très denses (en noir sur l'image), de parenchyme et de rayons ligneux orientés selon la direction radiale.

Les contours des plages constitutives sont vectorisés grâce à un logiciel développé au LERMAB (MeshPore) (Perré 2005), information reprise par un mailleur commercial (Easymesh).

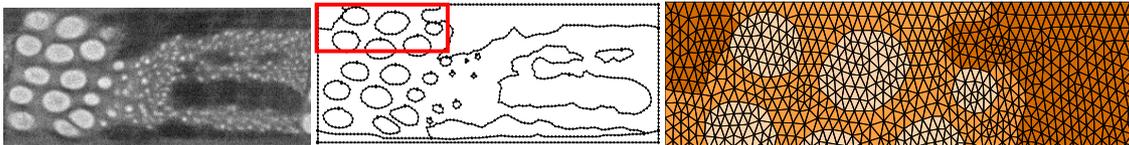


Figure 2 : Image d'un Volume Élémentaire Représentatif (de l'échantillon de la Figure 1) d'un accroissement annuel de chêne, définition des contours des plages de tissus constitutifs et détail du maillage par éléments finis triangulaires.

Chaque étape de la chaîne est contrôlée. Il est ainsi possible réaliser des maillages par éléments finis triangulaires très représentatifs de la structure de l'accroissement annuel. Sur la base de ces maillages et la connaissance des propriétés individuelles des tissus (Badel & Perré 1999; Badel & Perré 2001), l'application de méthodes d'homogénéisation périodiques permettent de calculer les propriétés macroscopiques de la structure considérée (Sanchez-Huber & Sanchez-Palencia 1992). Un logiciel, MorphoPore, développé au LERMAB est ici utilisé pour le calcul (Perré & Badel 2003).

2 Effet du raffinement du maillage

Le raffinement du maillage est défini par l'utilisateur qui peut ainsi optimiser entre le nombre d'éléments triangulaires et la description la plus fidèle possible de la structure réelle matériau. Il faut garder ici à l'esprit qu'il est toujours nécessaire de trouver un compromis entre le temps de calcul, la taille des données à gérer et la précision des résultats souhaitée. Afin d'étudier l'influence de la taille des éléments triangulaires par rapport à la morphologie du matériau, nous avons, sur un exemple de morphologie typique du bois de chêne, réalisé une image par rayons X d'un accroissement annuel. A partir de cette image, plusieurs maillages ont été générés en modifiant à chaque fois la taille moyenne de l'élément triangulaire de base. Le nombre de degrés de liberté varie entre 236 pour le maillage le plus grossier à 9848 pour le plus fin. La Figure 3 représente l'image X de base du Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.) et 4 exemples de maillages avec des degrés de raffinement différents. Le nombre de degrés de liberté tient compte du fait que pour des raisons de périodicités liées aux calculs d'homogénéisation, les points situés sur des cotés

opposés ont les mêmes déplacements dans les deux directions du plan ainsi que du fait que les 4 coins du maillage sont fixes.

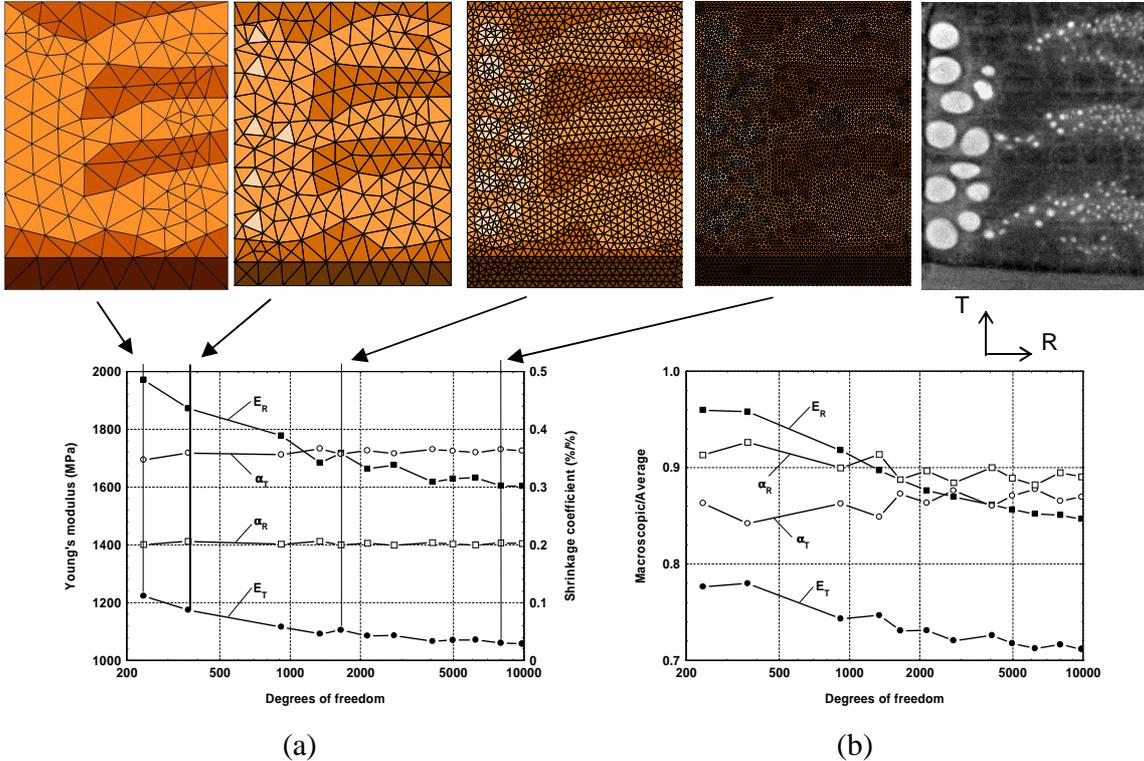


Figure 3 : 4 degrés de raffinement de maillage. respectivement : 336, 2786 et 9848 degrés de liberté et image par atténuation X du Volume Élémentaire Représentatif. Evolution des propriétés macroscopiques en fonction du nombre de degrés de libertés. Valeurs brutes (a) et adimensionnées (b)

Les graphiques (a) et (b) de la figure 4 représentent les évolutions des propriétés mécaniques élastiques et du retrait hydrique calculées pour chacun des maillages. On observe une stabilité des propriétés de retrait hydrique avec de faibles variations oscillantes et opposées : le retrait diminue dans la direction radiale lorsqu'il augmente dans la direction tangentielle (et inversement). Ces propriétés sont peu affectées par la proportion, voire la disparition, des gros vaisseaux. Ceci s'explique par le fait que sans prise en considération d'une anisotropie locale du matériau, la présence de pores ne joue aucun rôle sur les comportements de retrait, i.e. la propriété macroscopique est égale à la propriété microscopique de la matrice.

L'oscillation est due à la précision de la définition de la largeur tangentielle (T) du rayon ligneux, élément aux propriétés mécaniques importantes et au retrait relativement faible par rapport aux autres types de tissu. Cet effet est bien visible lors du passage entre le premier et le 2^{ème} maillage où la proportion de rayon ligneux diminue nettement, faisant augmenter le retrait radial (et diminuer le retrait tangentiel). Plus le raffinement augmente plus la position de la limite du rayon ligneux tend à converger vers la position réelle.

Par contre, pour les propriétés mécaniques élastiques, on observe une décroissance régulière dans les deux directions. Ceci peut être attribué à l'augmentation progressive de la proportion de gros vaisseaux, éléments aux propriétés mécaniques nulles, dont la forme est mieux décrite et le nombre augmenté par l'apparition de vaisseaux de plus en plus petits avec le raffinement. Cependant, les valeurs tendent à converger et les variations n'excèdent plus 5% entre 2000 et 10 000 degrés de liberté, signe que la résolution spatiale est devenue suffisamment fine pour bien décrire les plages de tissus qui composent le matériau.

3 Influence de la taille du Volume Elémentaire Représentatif

Dans le cadre des théories d'homogénéisation, la définition du Volume Elémentaire Représentatif, noté V.E.R., joue un rôle prédominant. Que ce soit par symétrie ou par translation, cet élément est choisi pour représenter au mieux la structure du matériau étudié. Dans notre cas, par exemple, les propriétés calculées sont celles d'un matériau périodique dont la cellule de base se répéterait à l'infini par translations selon les deux directions R et T. Dans un milieu hétérogène, le choix d'un volume particulier, et en particulier sa taille, sont donc des éléments cruciaux. Par exemple, pour des bois à structure cellulaire très régulière comme l'épicéa, des travaux antérieurs (Farruggia 1998) ont montré qu'une centaine de cellules pouvaient être suffisantes pour représenter le matériau et prédire ses propriétés élastiques. Dans le cas du bois de chêne, dont la structure apparaît très hétérogène à l'échelle des tissus, il semblait a priori que le V.E.R. pertinent pouvait être limité à l'accroissement annuel dans la direction radiale et borné par 2 gros rayons ligneux dans la direction tangentielle. Pour répondre à cette question, nous avons ici travaillé à partir de l'image par atténuation X d'un échantillon sélectionné pour son homogénéité apparente de structure ; c'est-à-dire principalement la régularité inter-annuelle de vitesse de croissance.

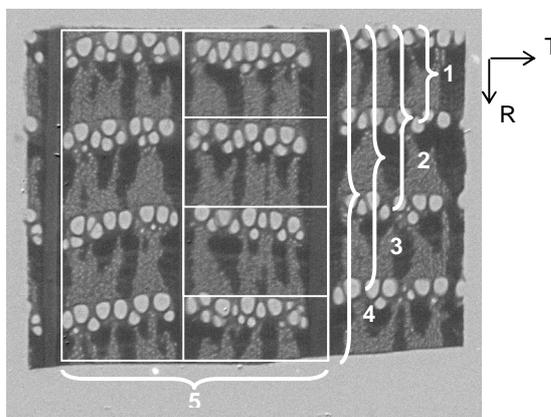


Figure 4. Image de base et échantillonnage des différentes zones utilisées pour la réalisation de maillages par éléments finis.

Cinq maillages, représentant des zones de plus en plus étendues, ont été construits. La première "unité de base" (zone 1 sur la Figure 4) est simplement délimitée par un accroissement annuel dans la direction radiale et limité dans la direction tangentielle par un gros rayon ligneux et un second de très faible dimension (non visible sur l'image), en incluant le premier. Les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} V.E.R. sont composés de 2, 3 et 4 "unités de base"

ayant les mêmes limites tangentielles mais prenant en considération les accroissement des années suivantes. Enfin, un dernier V.E.R. prend en considération les 4 années de croissance radiale et est étendu dans la direction tangentielle jusqu'au gros rayon ligneux suivant.

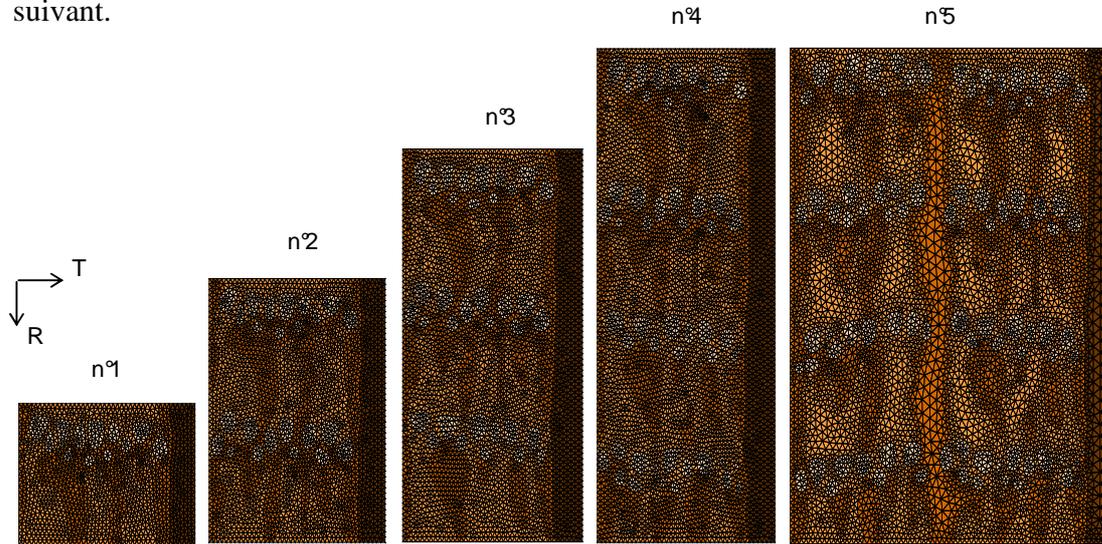


Figure 5 : maillages réalisés sur cinq V.E.R., chacun incluant le précédent conformément à la Figure 4.

Lors de la fabrication de ces maillages, nous avons pris soin d'utiliser la même finesse de discrétisation des contours de plages de tissus afin de s'affranchir de l'effet du raffinement du maillage (cf. § 2). Dans le cas particulier du plus grand V.E.R., nous avons cependant utilisé la possibilité d'augmenter la taille des éléments triangulaires à l'intérieur de certaines grandes plages de tissus (sans modifier la finesse de définition des contours) afin de rester sous la limite du nombre de nœuds imposée par le générateur de maillage. Enfin, il faut noter que nous n'avons pas pris en considération le très fin rayon ligneux situé au centre du V.E.R.. Celui-ci n'était apparent que sur la moitié des accroissements et s'est avéré plus fin que la taille des éléments triangulaires.

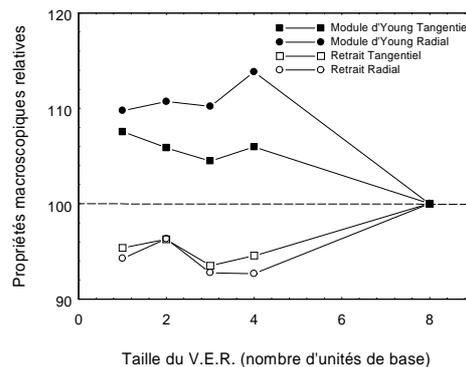


Figure 6 : évolutions des propriétés macroscopiques calculées en fonction de la taille du V.E.R. Dans chaque configuration, la valeur de référence choisie est celle du V.E.R. le plus grand (4 pour a et 8 pour b)

Les propriétés macroscopiques de chacun des V.E.R. ont été calculées par MorphoPore. La Figure 6 représente les évolutions relatives des coefficients de retrait hydrique et des

modules d'Young dans les deux directions (R et T) en fonction de la taille du V.E.R.. Les propriétés de référence (base 100) sont celles du plus grand V.E.R.(n°5).

On constate que les résultats sont assez stables avec des variations de quelques pour-cent entre les V.E.R. 1, 2, 3 et 4 pour les propriétés mécaniques comme pour celles de retrait. On peut certainement mettre cette stabilité sur le compte du choix de cet échantillon qui avait été spécialement sélectionné pour son homogénéité apparente de structure. Par exemple, la vitesse de croissance est particulièrement régulière, générant une constance dans la proportion bois de printemps / bois d'été.

Par contre, l'élargissement de la structure dans la direction tangentielle peut amener d'importantes modifications sur les propriétés macroscopiques calculées (V.E.R. n°5). A l'observation, la structure, bien que complexe, semble aussi régulière que sur les V.E.R. précédents. On observe cependant une baisse très nette des modules d'Young et une augmentation des retraits ; ceci dans les deux directions. L'explication vient du rôle important du rayon ligneux, élément rigide (en particulier dans la direction radiale) et au retrait moins prononcé que les autres tissus. Le fait de doubler la dimension tangentielle du V.E.R. sans ajout de nouveau rayon ligneux a donc logiquement pour effet de diminuer sa contribution aux propriétés macroscopiques.

4 Conclusion

Les images numériques par atténuation de rayons X sont de bons supports pour la réalisation des maillages par éléments finis qui permettent de décrire la structure du bois de chêne en respectant au mieux la morphologie réelle. Le contrôle total de la chaîne de construction des maillages permet à l'utilisateur de gérer le compromis entre la taille du maillage et la fidélité de la représentation de la structure réelle du matériau. Les propriétés mécaniques sont les plus affectées par une mauvaise description. Il semble qu'à partir du moment où les gros vaisseaux, dont le diamètre peut être estimé à 200 μm , sont correctement représentés, le raffinement peut être considéré comme suffisant. Notons qu'une bonne optimisation de la finesse-taille du maillage serait d'adapter la dimension des éléments triangulaires à celle des plages de tissu décrites. Ce type d'optimisation peut paraître séduisant. Cependant, dans la pratique, il s'avère en général plus rapide de mailler identiquement l'ensemble.

Enfin, les résultats sur la taille du Volume Élémentaire Représentatif semblent montrer que dans le cas d'une structure à accroissements annuels réguliers, l'unité de base limitée à un accroissement en radial et bornée par 2 gros rayons ligneux dans la direction tangentielle est pertinente sous réserve de porter une attention particulière à la proportion des gros rayons ligneux.

Références

- Badel, E., Perré P. 1999. Détermination des propriétés élastiques d'éléments individuels du plan ligneux du chêne par des essais de traction sur micro-éprouvettes, *Annals of Forest Sciences*. 56: 467-478.
- Badel, E., Perré P. 2001. Using a digital X-ray imaging device to measure the swelling coefficients of a group of wood cells, *NDT&E*. 34: 345-353.

Badel, E., Perré P. 2002. Predicting oak wood properties using X-ray inspection: representation, homogenisation and localisation. Part I: Digital X-ray imaging and representation by finite elements, *Annals of Forest Sciences*. 59: 767-776.

Farruggia, F. 1998. Détermination du comportement élastique d'un ensemble de fibres de bois à partir de son organisation cellulaire et d'essais mécaniques sous microscope. ENGREF, Nancy.

Perré, P. 2005. Meshpore: A software able to apply image-based meshing techniques to anisotropic and heterogeneous porous media, *Drying Technology*. 239-11: 1993-2006.

Perré, P., Badel E. 2003. Predicting oak wood properties using X-ray inspection: representation, homogenisation and localisation. Part II: Computation of macroscopic properties and microscopic stress fields, *Annals of Forest Sciences*. 60: 247-257.

Sanchez-Huber, J., Sanchez-Palencia E. 1992. Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation. Paris, Masson.