

Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : application au bois massif

REBHI Amal¹, COUREAU Jean-Luc¹, CHAPLAIN Myriam¹, GRAZIDE Cécile²

¹Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Département Environnement et Génie Civil (GCE), Université de Bordeaux, Talence, France

²Laboratoire de matériaux composites pour la construction (LMC²), Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France
amal.rebhi@u-bordeaux.fr

Mots clefs : modélisation numérique; méthode des éléments finis; mécanique d'endommagement; rupture; bois; quasi-fragile; ductile.

Contexte et objectifs

Le bois est un matériau fortement anisotrope difficile à modéliser, ses propriétés sont très variables et sont sensibles aux conditions environnementales et de chargement. Aussi, le comportement mécanique à la rupture de ce matériau diffère selon le mode de sollicitation et la direction d'orthotropie, il a un comportement quasi-fragile en traction et en cisaillement et un comportement ductile en compression. La majorité des approches existant pour étudier les comportements à la rupture du bois, sont principalement basées sur des critères de rupture associés au comportement élastique, ((Baño et al. 2011), (Grazide et al. 2018), (Lukacevic et al. 2019) ...) et ils ont utilisé des critères de rupture élastique comme le critère de Tsai-Hill et le critère de Tsai-WU. Ces critères permettent de déterminer la force qui correspond à l'initialisation de l'endommagement, mais ils ne sont pas capables de prédire de manière précise la force de rupture et de présenter l'allure de la partie post-pic de la courbe force-déplacement. Pour palier à ce manque, Sandhaas et al. (2013) ont développé un modèle d'endommagement basé sur des critères de plasticité. En effet ils ont proposé huit critères sur les contraintes pour décrire l'endommagement du bois suivant chaque mode de sollicitation (traction, compression et cisaillement) et pour définir les surfaces de ruptures. Le comportement non linéaire est obtenu par la modification d'une matrice de rigidité ou bien d'une matrice de conformité, en la multipliant par un tenseur d'endommagement qui contient les variables d'endommagement. Ensuite, les incréments de contrainte sont calculés à partir des incréments de déformation via la matrice de rigidité variable. Le calcul de Sandhaas est basé sur la détermination des composantes du tenseur d'endommagement en fonction des paramètres élastiques et de rupture du matériau.

Les recherches élaborées auparavant pour étudier le comportement mécanique à la rupture du bois sont basées sur des critères de rupture en contrainte associés à l'élasticité, pas sur des modèles d'endommagement, ce qui peut conduire à un manque de précision dans l'estimation de la force de rupture.

La simulation du comportement endommageable du bois nécessite un modèle géométrique qui prend en compte les défauts du bois et un modèle d'endommagement appliqué aux matériaux anisotropes qui prend en compte la variation locale des propriétés mécaniques du bois due en particulier à la présence de nœuds et à la déviation de la pente du fil autour de ces nœuds.

L'objectif principal du travail de thèse concerne l'étude des mécanismes d'endommagement du bois massif de construction, par l'établissement d'outils numériques qui permettent de

modéliser le mécanisme d'endommagement du bois avec la prise en compte de ses caractéristiques hétérogènes anisotropes. Le point de départ est d'étudier les lois d'endommagement connues pour le béton et les pierres telles que la loi de Fichant, et voir comment les utiliser pour qu'elles soient adaptées au matériau biosourcé en intégrant l'anisotropie naturelle.

Méthode de Modélisation

Les lois d'endommagement existantes sont appliquées généralement aux matériaux isotropes même si l'endommagement est anisotrope. La méthode que nous avons retenue à ce jour pour développer un modèle d'endommagement pour un matériau orthotrope, est basée sur la loi de Fichant (Borderie et al 2009). Cette loi s'appliquant à l'endommagement des matériaux quasi fragiles isotropes, sera modifiée selon les caractéristiques mécaniques et géométriques du bois. De plus, le modèle doit avoir un critère ductile pour étudier l'endommagement du bois en compression.

La loi est basée sur le concept de la contrainte effective introduit par Kachanov, l'idée est d'associer à l'espace réel, où le matériau est endommagé, un espace fictif pour lequel le matériau est sain. Cela consiste à considérer que l'on obtient la même déformation pour le matériau sain équivalent et pour le matériau endommagé en lui appliquant la contrainte effective au lieu de la contrainte réelle:

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} \begin{cases} \sigma = A : \varepsilon & \text{matériau endommagé} \\ \tilde{\sigma} = A : \varepsilon & \text{matériau sain équivalent} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma = M(D) : \tilde{\sigma} \quad (2)$$

Avec $M(D)$ est un tenseur d'ordre 4 qui dépend de l'endommagement D ,

Cette méthode permet d'identifier la valeur de l'endommagement à partir des tenseurs de rigidité du matériau endommagé et du matériau sain dès lors que le tenseur M a été défini. Dans ce modèle on définit deux tenseurs d'endommagement un pour la traction (M_t) et l'autre pour la compression (M_c). C'est un tenseur défini pour l'endommagement anisotrope d'un matériau orthotrope (Murakami 2012).

En traction, le bois a un comportement quasi-fragile, dans ce cas les variables d'endommagement ont une forme exponentielle déterminée à travers la relation suivante (Fichant):

$$\begin{cases} d_{it} = 1 - \frac{\varepsilon_{ati}}{\varepsilon_{ii}^l} \exp(Bt_i(\varepsilon_{at0} - \varepsilon_{ii}^l)), & \varepsilon_{ii}^l \geq \varepsilon_{ati} \\ 0, & \varepsilon_{ii}^l < \varepsilon_{ati} \end{cases} \quad (3)$$

$$0 \leq d_{it/c} \leq 1$$

Avec ε_{ati} : la limite élastique de la déformation en traction dans la direction i

ε_{ii}^l : la déformation principale dans la direction i

Bt_i : paramètres d'endommagement en fonction du module d'Young, de la limite de déformation et de l'énergie de fissuration.

En compression le bois à un comportement ductile : la partie post-pic de la courbe force déplacement représente un plateau, dans ce cas les variables d'endommagement sont déterminées à partir de la relation (4) :

$$d_{ic} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{F_{c,i}}, & F_{c,i} \geq 1 \\ 0, & F_{c,i} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

Avec $F_{c,i}$ est le critère d'endommagement en compression déterminé en fonction de la contrainte effective de compression et la limite élastique de contrainte dans chaque direction (Sandhaas 2013) :

$$F_{c,i} = \left| \frac{\sigma_{ii}^-}{f_{c,i}} \right| \quad (5)$$

Les étapes à suivre pour développer la loi d'endommagement sont présentées dans le diagramme de la figure 1.

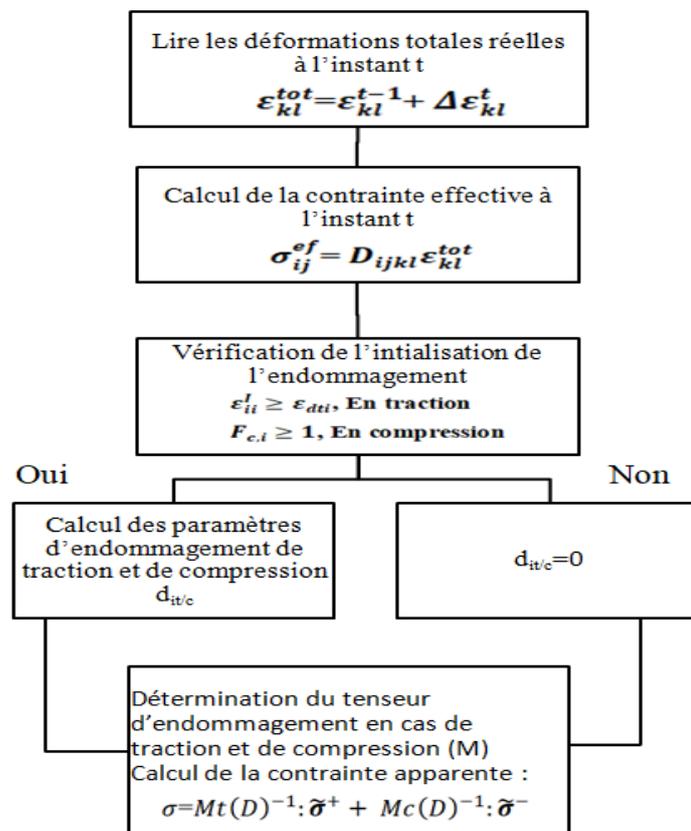


Fig. 1 : Diagramme de modélisation de l'endommagement***

Résultats

Afin d'effectuer la validation du modèle développé, les résultats expérimentaux de Sorin (Sorin 2018) en mode I et II sur une éprouvette (TDCB) d'Epicéa sont comparés avec les résultats numériques. On observe une bonne représentation de la loi en mode I et en mode II (Figure 2).

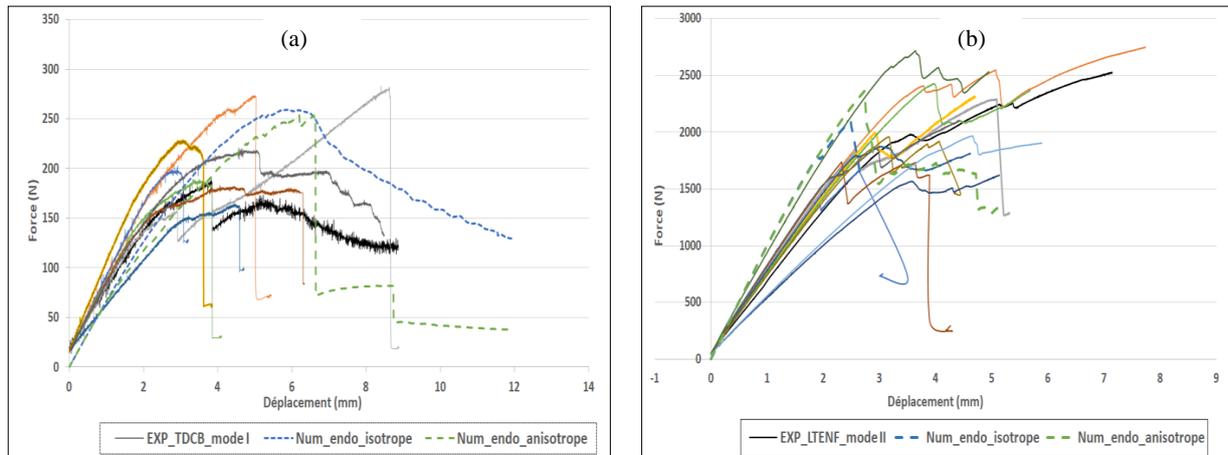


Fig. 2: Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques de Sorin en mode I (a) et II (b), deux cas d'endommagement ont été modélisés: endommagement isotrope et endommagement anisotrope. (Les résultats expérimentaux sont présentés avec un trait continu)

Conclusion et perspectives

Le modèle développé est capable de prendre en compte l'orthotropie du bois et d'étudier l'endommagement en mode I et II et en compression parallèle et perpendiculaire aux fils du bois. Les prochains travaux reposeront sur des tests du modèle sur différentes essences de bois résineux (Pin maritime, Douglas, etc), des tests du modèle en mode mixte et l'intégration de l'hétérogénéité du bois (les nœuds et la déviation de la pente des fils).

Références

- Baño V., Arriaga F., Soilán A., Guaita M. (2011) Prediction of Bending Load Capacity of Timber Beams Using a Finite Element Method Simulation of Knots and Grain Deviation, *Biosystems Engineering* 109 (4): 241- 49, 9.
- La Borderie C., Maurel O., Matallah M. (2009) Couplage endommagement fissuration : applications aux calculs de structures en béton armé, 19^{ème} Congres Français de Mécanique, 6.
- Grazide C., Coureau J-L, Cointe A., et Morel S. (2018) Mechanical Performance Curves for the Strength Grading of Maritime Pine. *European Journal of Wood and Wood Products* 76 (3): 877- 88, 12.
- Markus L., Kandler G., Hu M., Olsson A., Füssl J. (2019) A 3D Model for Knots and Related Fiber Deviations in Sawn Timber for Prediction of Mechanical Properties of Boards, *Materials & Design* 166 (mars): 107617,
- Murakami S. (2012) *Continuum Damage Mechanics*, Vol. 185, Solid Mechanics and Its Applications. Dordrecht: Springer Netherlands, 423.
- Sandhaas C., G. van de Kuilen J-W., J. Blass H. (2013) A 3d constitutive wood model using the concepts of continuum damage mechanics, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 19.
- Sorin E. (2018) *Fissuration En Modes Mixtes Dans Le Bois: Diagnostic et Évaluation Des Méthodes de Renforcement Local*, Mécanique [physics], Université de Bordeaux, Français. 196.