

# Développement d'un modèle d'endommagement anisotrope traduisant le comportement mécanique du bois de construction

**RESUME** Cette locale étude concerne la caractérisation du comportement mécanique du bois de construction, par l'élaboration d'un outil numérique basé sur le concept de la mécanique d'endommagement et qui permet d'étudier le comportement à la rupture des matériaux hétérogènes et anisotropes. Le point de départ est la calibration des lois d'endommagement connues pour les matériaux isotopes quasi-fragiles et de les développer pour qu'elles soient adaptées au matériau biosourcé en intégrant l'anisotropie naturelle. Le nouveau modèle proposé prend en compte l'orthotropie du bois, la variation locale des propriétés mécaniques due à des hétérogénéité induite par la présence des défauts du bois et le comportement de ce matériau selon le mode de chargement par rapport à l'axe longitudinal de fils. Les premières modélisations ont été développées et calées sur des résultats issus de la mécanique de la rupture en mode I, II et mixte sur des éprouvettes DCB avec du bois sans défaut. Ensuite le modèle a été appliqué à des essais de flexion sur du bois hétérogène (bois de construction).

**Mots-clefs** modélisation numérique, éléments finis, endommagement, rupture, bois.

## I. INTRODUCTION

Pour atteindre les objectifs de développement durable, d'utilisation de matériaux renouvelables et de lutte contre le changement climatique, le bois possède de nombreux avantages lui permettant d'être plus attractif que les matériaux employés majoritairement dans le domaine de la construction (acier et béton). En effet le bois est le seul matériau de construction totalement renouvelable, naturel et biologique. Pour cette raison la recherche s'intéresse plus à améliorer sa caractérisation mécanique.

La conception des structures en bois est réalisée selon la norme Eurocode 5 pour garantir leur tenue. Elle implique essentiellement une caractérisation macroscopique du bois en intégrant l'hétérogénéité et la variabilité intrinsèque de ce matériau par des analyses semi-probabilistes. En effet, le bois est un matériau fortement anisotrope, ses propriétés sont très variables et sont sensibles aux types de chargement et aux conditions environnementales. Le comportement mécanique de ce matériau est fortement influencé par les singularités de croissance et également par le mode de sollicitation par rapport aux directions d'orthotropie. En effet, les essais de rupture en flexion démontrent que la défaillance est due, dans plus de 90% des cas, à la présence de nœuds où la déviation de la pente de fil autour de ceux-ci. Compte tenu de la complexité de ce matériau par rapport à la variation de ses propriétés mécaniques, le développement des lois mathématiques présente donc un enjeu intéressant pour établir des modèles prédictifs fiables.

Dans l'objectif d'améliorer le classement mécanique du bois et limiter les essais de qualification, les scientifiques recherchent à développer des approches numériques pour étudier son comportement mécanique à la rupture, en considérant de l'anisotropie de ce matériau et de l'influence de ses hétérogénéités induite par la présence de nœuds. La majorité des approches existantes sont principalement basées sur des

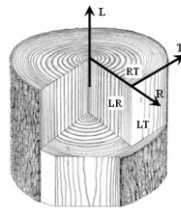
critères de rupture associés au comportement élastique (Baño et al. (2011), Grazide et al. (2018), Lukacevic et al. (2019)...), elles ont utilisé des critères de rupture basée sur l'élasticité comme le critère de Tsai-Hill et le critère de Tsai-WU. Ces derniers permettent de déterminer la force qui correspond à l'initiation de l'endommagement, mais ils ne sont pas capables de prédire correctement la force de rupture et de décrire l'allure de la partie post-pic de la courbe force-déplacement. La simulation du comportement du bois nécessite alors un modèle qui prend en compte les défauts du bois, la variation de pente de fil et qui intègre l'endommagement du matériaux anisotropes pour prévoir l'amorçage et la propagation des détériorations. Ce travail s'inscrit dans ce cadre, nous proposons une nouvelle approche non-linéaire basée sur la mécanique de l'endommagement continu (MEC) pour étudier le comportement mécanique du bois de construction en prenant en compte tous ses caractéristiques.

La MEC est une approche élastique non linéaire qui a été développée en 1958 par Rabotnov et Kachanov pour étudier la rupture par fluage et par la suite elle a été utilisée par plusieurs chercheurs pour décrire la rupture des métaux, ce concept est inscrit dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles (Lemaitre & Chaboche (1996)). Elle est devenue un outil prometteur pour la description de la dégradation des matériaux. L'endommagement est présenté par des variables scalaires ou bien tensorielles selon l'objectif à atteindre lors de la modélisation. Dans notre cas, l'endommagement est anisotrope et plusieurs variables sont définies selon chaque type de sollicitation (traction, compression ou cisaillement). La MEC est basée sur le concept des contraintes effectives qui consiste à associer à l'espace réel endommagé un espace fictif pour lequel le matériau est sain. Des nouvelles grandeurs sont définies dans cet espace qui doivent être reliées aux grandeurs réelles selon le principe d'équivalence utilisé (principe d'équivalence en déformation, principe d'équivalence en contrainte ou principe d'équivalence en énergie). Les incréments des contraintes sont calculés en fonction des incréments des déformations via une matrice de rigidité effective déterminée en fonction et de la matrice de rigidité initiale et des variables d'endommagement.

La validation de l'approche est effectuée en deux étapes. L'objectif des premières modélisations est de vérifier les paramètres du modèle en l'appliquant à des essais de rupture en mode I, II et mixte sur des éprouvettes de pin Maritime du bois sans défauts. Nous utilisons ensuite le modèle pour étudier le comportement à la flexion de poutres de bois de construction, en intégrant la variation locale des propriétés mécaniques due aux défauts.

## II. DÉVELOPPEMENT DE LA LOI DE COMPORTEMENT

Avant d'introduire le modèle, il est nécessaire de définir quelques indices utilisés pour le matériau bois. Du fait de son mode de croissance, le bois est caractérisé selon ses trois directions naturelles: longitudinale (L'axe de l'arbre), radiale (R) et tangentielle (T) et de ses trois plans: radial (LR), tangentiel (LT) et transversal (RT) (voir figure 1). Dans le domaine élastique, le comportement du bois parfait est déterminé via la



**FIGURE 1. Repère d'orthotropie du matériau bois**

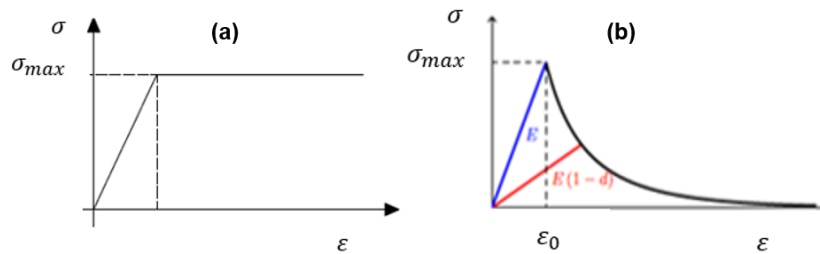
loi de Hooke généralisée (Éq (1)), qui fait apparaître la matrice de souplesse élastique symétrique, les com-

posants de cette matrice sont modifiés au cours du chargement en fonction de l'évolution des variables de l'endommagement.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{RR} \\ \tilde{\sigma}_{TT} \\ \tilde{\sigma}_{LL} \\ \tilde{\sigma}_{TL} \\ \tilde{\sigma}_{LR} \\ \tilde{\sigma}_{RT} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A. Initiation et évolution de l'endommagement

Pour une description complète et simplifiée du comportement mécanique du bois en tant que matériau orthotrope, différents critères de rupture suivant chaque mode de sollicitation ont été définis (voir figure 2).



**FIGURE 2. Contrainte-déformation: (a) comportement ductile en compression, (b) comportement adoucissant en traction**

En traction parallèle ou bien perpendiculaire au fil, le bois a un comportement quasi-fragile. En cas de traction parallèle ( $\sigma_L > 0$ ), l'initiation d'endommagement est pilotée par la déformation dans la direction longitudinale et le critère d'endommagement ( $F_{t,L}$ ) est donné par la relation suivante :

$$F_{t,L} = \frac{\varepsilon_{t,L}}{\varepsilon_{dt,L}} \leq 1 \quad (2)$$

où  $\varepsilon_{t,L}$  est la déformation dans la direction longitudinale et  $\varepsilon_{dt,L}$  est la limite élastique de déformation.

En traction radiale ou bien tangentielle ( $\sigma_n > 0$ ), l'endommagement est causé soit par les déformations de traction ( $\varepsilon_n$ ) soit par les déformations de cisaillement ( $\varepsilon_{Ln}$  et  $\varepsilon_{RT}$ ) ou les deux (n=R ou T). Le critère d'endommagement ( $F_{t,n}$ ) est donné par la formule suivante :

$$F_{t,n} = \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon_{dt,n}^2} + \frac{\varepsilon_{Ln}^2}{\varepsilon_{d,Ln}^2} + \frac{\varepsilon_{RT}^2}{\varepsilon_{d,RT}^2} \leq 1 \quad (3)$$

où  $\varepsilon_{dt,n}$ ,  $\varepsilon_{d,Ln}$  et  $\varepsilon_{d,RT}$  sont respectivement la déformation élastique limite de traction dans la direction n (n=R ou T), la déformation limite de cisaillement dans le plan Ln et la déformation limite de cisaillement dans le plan RT.

Pour tenir compte du comportement quasi-fragile du bois en traction ainsi que des paramètres relatifs à la rupture, nous nous intéressons aux lois existant sur l'endommagement des matériaux isotropes tels que la loi de Fichant et de Mazars (Fichant et al. (1999)). Ces lois utilisent l'énergie de rupture et les déformations comme paramètres principaux pour prédire le comportement du matériau. Les variables d'endommagement de traction ( $d_{t,n}$ ) dans chaque direction d'orthotropie (n =L, R ou T), ont une forme

exponentielle déterminée à travers la relation suivante.

$$\begin{cases} d_{t,n} = 1 - \frac{1}{k} \exp(B_n(\varepsilon_{dt,n} - \varepsilon_{t,n})) \\ 0 \leq d_{t,n} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

où  $\varepsilon_{dt,n}$  est la limite élastique de la déformation en traction dans la direction d'orthotropie n,  $\varepsilon_{t,n}$  la déformation de traction dans la direction n à l'instant t du calcul, k est la variable d'état qui dépend des critères de rupture et  $B_n$  un paramètre d'endommagement déterminé par la relation suivante:

$$B_n = \frac{hE_n\varepsilon_{dt,n}}{G_{f,n} - \frac{1}{2}hE_n(\varepsilon_{dt,n})^2} \quad (5)$$

où  $E_n$  est le module d'Young dans la direction n,  $G_{f,n}$  l'énergie de fissuration en traction et h est la taille de l'élément. La taille des éléments finis dans le modèle est liée à la méthode de régularisation énergétique utilisée pour résoudre les problèmes de localisation de l'endommagement, qui est principalement dû au caractère d'adoucissement.

En compression le bois à un comportement ductile : la partie post-pic de la courbe force déplacement présente un plateau, dans ce cas les critères d'initiation d'endommagement dans chaque direction  $F_{c,n}$  sont déterminés en fonction des déformations de compression par la formule suivante :

$$F_{c,n} = \left| \frac{-\varepsilon_{c,n}}{\varepsilon_{dc,n}} \right| \leq 1 \quad (6)$$

où  $\varepsilon_{dc,n}$  est la déformation seuil de compression dans la direction n et  $\varepsilon_{c,n}$  la déformation à l'instant de chargement t.

Le dépassement des seuils de déformation en compression déclenche un comportement ductile où la variable de dommage ( $d_{c,n}$ ) suit une loi élastoplastique parfaite.

$$\begin{cases} d_{c,n} = 1 - \frac{1}{K} \\ 0 \leq d_{c,n} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Le développement des variables d'endommagement (équation 4 et 7) dépend de la variable d'état K, qui est déterminée à chaque instant de chargement en fonction des critères de défaillance. Cette relation est utilisée pour déterminer la valeur de K.

$$k^t = \max(1, \max_{incr=0,t} (F^{incr})) \quad (8)$$

Le bois a un comportement quasi-fragile en cisaillement, qui est dans l'approche proposée, lié à son comportement en traction et en compression. En effet, la rupture parallèle au plan LR par exemple peut être causée par une tension perpendiculaire au fil (mode I), un cisaillement (mode II) ou une combinaison des deux (mode mixte). Donc, il n'est pas possible de définir des modes de défaillance distincts pour chaque direction de contrainte, un couplage est proposé. Par conséquent, l'endommagement en cisaillement est déterminé en fonction de celui en traction et en compression.

Au final, il y a six variables d'endommagement, trois en traction ( $d_{t,n}$ ) et trois en compression ( $d_{c,n}$ ) (n=R, T ou L). En utilisant l'opérateur mathématique de Macaulay pour différencier les variables d'endommagement qui sont activées par le même composant de contrainte, mais qui sont sensibles au signe du composant, c.-à-d les contraintes de traction ou de compression. Dans chaque direction d'orthotropie la variable d'endommagement est donnée donc par la relation suivante:

$$D_n = d_{t,n} \frac{\langle \sigma_n \rangle}{|\sigma_n|} + d_{c,n} \frac{\langle -\sigma_n \rangle}{|\sigma_n|}, \text{ où } \langle a \rangle = \frac{a + |a|}{2} \quad (9)$$

Chaque modèle d'endommagement doit respecter les deux principes de la thermodynamique pour être thermodynamiquement cohérent et physiquement valide. Le premier principe stipule que l'énergie de déformation doit être conservée, ce qui signifie que l'énergie absorbée par le matériau doit être égale à la somme de l'énergie élastique et de l'énergie dissipée sous forme de déformation irréversible. Le second principe implique que l'entropie du système doit augmenter avec l'endommagement, car l'endommagement conduit à une augmentation du désordre dans le matériau. Pour respecter ce principe, la dissipation associée à chaque variable d'endommagement doit être positive, c'est-à-dire que  $Y_n d'_n > 0$ , où  $Y_n$  est la force thermodynamique associée à la variable d'endommagement  $d_n$  et  $d'_n > 0$  car la variable d'endommagement est une fonction croissante lors du chargement.

La force thermodynamique  $Y_n$  peut être calculée en prenant la dérivée partielle de la fonction de potentiel de l'énergie libre  $\Psi$  par rapport à la variable d'endommagement  $d_n$ , il faut donc vérifier le signe de  $Y_n, \forall \varepsilon$  et  $\forall 0 < d_n < 1$  :

$$Y_n = \frac{\partial \Psi(\varepsilon, D_{ij})}{\partial d_n} = \frac{1}{2\rho} \frac{\partial(\varepsilon : (M^{-1} : C^{el}) : \varepsilon)}{\partial d_n} \tag{10}$$

Cette formulation garantit que le modèle d'endommagement respecte les deux principes de la thermodynamique.

*B. Loi constitutive du modèle*

La loi est basée sur le principe des déformations équivalentes et des contraintes effectives qui consiste à considérer que l'on obtient la même déformation pour le matériau sain équivalent que pour le matériau endommagé en lui appliquant la contrainte effective au lieu de la contrainte réelle :

$$\varepsilon = \tilde{\varepsilon} \begin{cases} \sigma = C^{end} : \varepsilon & \text{matériau endommagé} \\ \tilde{\sigma} = C^{el} : \varepsilon & \text{matériau sain équivalent} \end{cases} \tag{11}$$

La contrainte réelle est liée à la contrainte effective par un tenseur d'endommagement d'ordre 4 qui dépend des variables d'endommagement. Dans le cas d'une transformation générale comme dans l'équation (9), la symétrie du tenseur de contrainte effective ne peut être garantie. Une méthode de symétrie pour la transformation efficace des contraintes doit être appliquée pour s'assurer que l'analyse ultérieure est aussi simple que possible. Dans ce cas, Cordebois et Sidoroff (Cordebois & Sidoroff (1982)) ont proposé deux techniques de symétrie couramment utilisées dans la littérature : la symétrie du produit et la symétrie de la somme. Ces techniques conduisent à un tenseur d'endommagement d'ordre 4. L'expression dans l'équation (10) représente la symétrie de type produit du tenseur de contrainte effective qui a été utilisé dans ce travail.

$$\tilde{\sigma}_{ij} = (\delta_{ik} - D_{ik})^{-1/2} \sigma_{kl} (\delta_{jl} - D_{jl})^{-1/2} \tag{12}$$

Dans notre cas le tenseur d'endommagement correspondant est donc :

$$M_{ij} = \begin{cases} \left[ \begin{array}{cccccc} \Phi_R & \Phi_T & \Phi_L & \Phi_T^{1/2} \Phi_L^{1/2} & \Phi_R^{1/2} \Phi_L^{1/2} & \Phi_R^{1/2} \Phi_T^{1/2} \end{array} \right] & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{13}$$

Avec  $\Phi_n = \frac{1}{1-D_n}$ , (n=R,T,L).

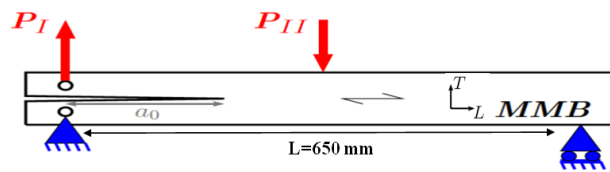
Le tenseur de contrainte réelle est donc lié au tenseur de contrainte effective avec la relation suivante:

$$\tilde{\sigma} = M(D) : \sigma \tag{14}$$

Ce modèle a été développé dans le code de calcul aux éléments finis Cast3M à travers le générateur du code MFront. Pour chaque point de Gauss, les propriétés des constituants qu'il représente sont calculées à chaque instant du chargement, et en chacun se trouve la loi de comportement (Eq.12) comprenant la loi d'évolution de l'endommagement suivant le mode de sollicitation (traction, compression au cisaillement).

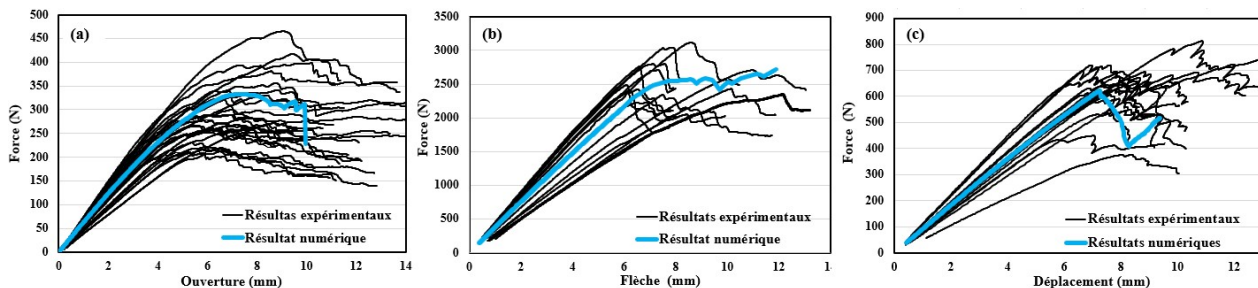
### III. SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS SANS DÉFAUTS

Afin d'effectuer la validation du modèle développé, les résultats expérimentaux de Perez (2021) en mode I, II et mixte sur des éprouvettes de pin Maritime sont comparés aux résultats numériques. La géométrie de l'éprouvette et les conditions aux limites proposées pour les trois configurations expérimentales (mode I, II et mixte) sont schématisées en figure 3. Dans un premier temps, nous avons utilisé les propriétés élastiques et mécaniques expérimentales moyennes et les énergies de fissuration expérimentales moyennes (en mode I,  $G_{fI}=550$  N/m et en mode II,  $G_{fII}=1739$  N/m). Dans un second temps, pour valider chaque essai, nous avons fait une comparaison courbe à courbe.



**FIGURE 3.** Essai "Mixed-Mode Bending" : combinaison de l'essai DCB en mode I (pour  $P_{II}=0$ ) et de l'essai en mode II (pour  $P_I=0$ ) (même dimension de l'éprouvette pour les trois modes de rupture)

Les résultats numériques sont comparés avec ceux expérimentaux en analysant les courbes force-déplacement ainsi que les courbes de résistances correspondantes pour vérifier les énergies de fissuration déclarées dans le modèle. La variabilité observée entre les courbes expérimentales est due à la variabilité intrinsèque du bois parfait sans défauts, qui est liée à des facteurs tels que l'humidité et la densité. Les courbes de résistances (courbe-R) sont déterminées à partir des courbes force-déplacement et sur la base de la mécanique élastique de la rupture équivalente (MLReq). Elles permettent d'obtenir une estimation des propriétés de rupture et aussi des informations sur l'étendue de la zone d'élaboration de la rupture. En utilisant les propriétés élastiques et de rupture moyens de Perez, nous observons une bonne représentation du modèle en mode I, II et mixte (voir figures 4 et 5).



**FIGURE 4.** Courbes force-déplacement: (a) mode I; (b) mode II; (c) mode mixte

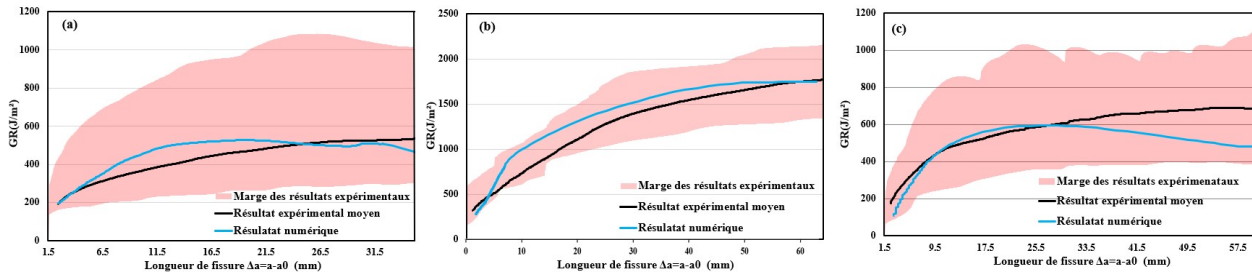


FIGURE 5. Courbes de résistance: (a) mode I; (b) mode II; (c) mode mixte

#### IV. SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS HÉTÉROGÈNE

Le modèle a été testé ensuite sur du bois hétérogène par des essais de flexion. Une vingtaine des poutres sont testées expérimentalement à deux échelles différentes, en flexion trois points (11 échantillons) de 1200 mm de longueur et d'une section de 100×50 mm<sup>2</sup> et en flexion quatre points (11 échantillons) de 3000 mm de longueur et d'une section de 140×45 mm<sup>2</sup> (voir figure 7). La variation de la pente de fil et les paramètres géométriques des nœuds ont été déterminés expérimentalement et sont pris en compte dans la modélisation pour déterminer les propriétés élastiques et de rupture locaux du bois. La mesure de la pente de fil est réalisée par un scanner appelé Xyloprofil. Il s'appuie sur la projection d'une ligne de lasers points perpendiculairement aux axes longitudinaux du bois et en déplaçant la poutre longitudinalement, il est possible de mesurer l'angle de fils chaque 5 mm (voir figure 6). La modélisation de la pente de fil est réalisée à partir d'une procédure numérique qui est capable de lire les données expérimentales de la pente en fonction des coordonnées de chaque point de la poutre et de l'interpoler dans le maillage pour construire le champ de variation de la pente. Les paramètres élastiques et mécaniques locaux, tels que les modules d'Young, les coefficients de Poisson, les modules de cisaillement, les résistances limites et les énergies de fissuration, sont calculés à l'aide de matrices de passage qui sont déterminées en fonction de la valeur de la pente dans chaque élément de maillage (voir figure 8). La modélisation numérique (2D) de ces poutres est réalisée en utilisant les propriétés mécaniques moyennes du bois parfait et les données expérimentales de la variation de la pente. Dans le but d'améliorer la précision de la prédiction de la charge de rupture, il est prévu d'appliquer une méthode de maillage EF qui consiste à augmenter la densité du maillage en fonction de la distance par rapport au nœud. Cette approche permettra de mailler avec une plus grande densité les zones situées à proximité du nœud, car ces zones présentent des directions d'orthotropie plus importantes, ce qui peut causer une concentration de contrainte et potentiellement conduire à la rupture. La contrainte de rupture est déterminée en prenant la moyenne des résultats numériques trouvés pour les deux faces de la poutre. La figure (9) représente les courbes force-déplacement trouvées expérimentalement et par simulation numérique ainsi que le schéma de fissuration au moment de la rupture d'une poutre chargée en flexion trois points. Avec les données de la variation des pentes de fils des propriétés mécaniques moyennes, nous avons trouvé une bonne corrélation ( $R^2=0.82$ ) entre les résultats numériques et expérimentaux de la contrainte de rupture pour les deux échelles testées (voir figure 10).

#### V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

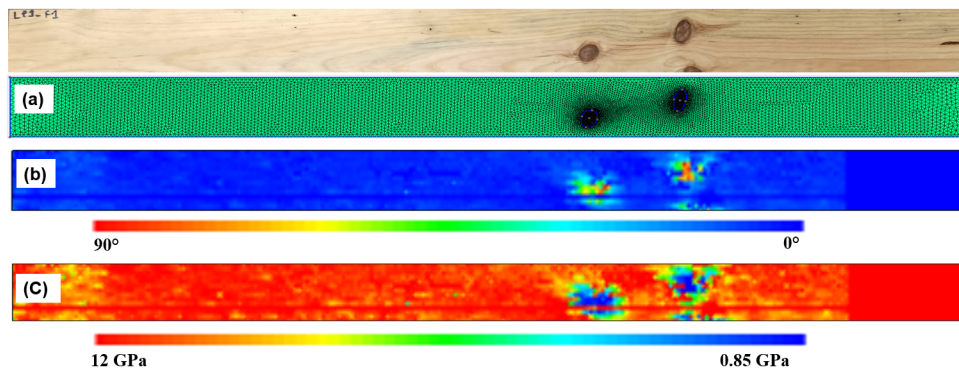
Dans ce travail, un modèle d'endommagement anisotrope pour le bois a été développé. Le modèle proposé est capable de modéliser le comportement à la rupture du bois avec ses hétérogénéités, en implémentant les critères d'endommagement du bois suivant le mode de chargement: un comportement adoucissant du bois



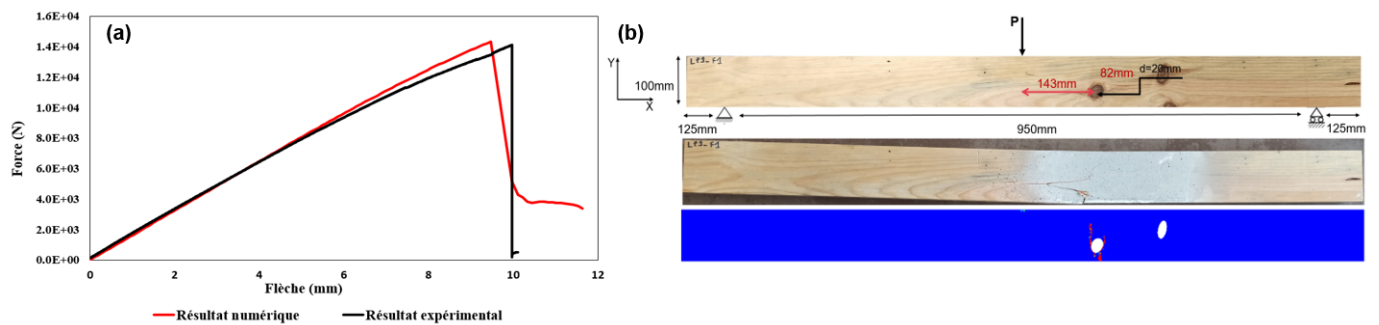
**FIGURE 6.** Scan des bois au Xyloprofil et mesure de la variation de la pente de fils



**FIGURE 7.** Montage de l'essai de flexion quatre points



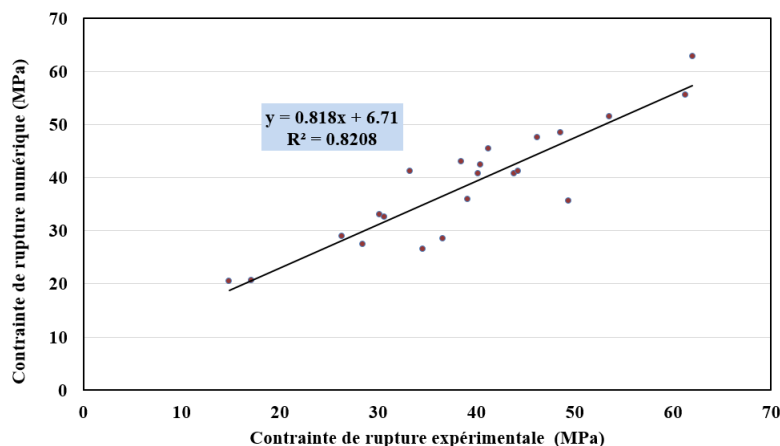
**FIGURE 8.** Modélisation de la pente de fil : (a) maillage par EF, (b) variation de l'angle de fil en chaque point du maillage, (c) variation du module d'élasticité longitudinal en fonction de la pente de fil



**FIGURE 9.** Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour une poutre du bois hétérogène soumise à un chargement en flexion : (a) prédiction de la force de rupture ; (b) faciès de rupture.

en traction et en cisaillement et un comportement ductile en compression.

Bien que le modèle ne prenne pas explicitement en compte les effets unilatéraux, il convient de noter que le matériau étudié est orthotrope et que nous avons utilisé une loi d'endommagement anisotrope pour décrire sa réponse dans différentes directions de déformation, que ce soit en compression ou en traction. Cette loi d'endommagement permet de considérer implicitement les effets unilatéraux, qui sont inhérents à la nature



**FIGURE 10.** Comparaison des contraintes de rupture obtenues expérimentalement et numériquement

orthotrope du matériau.

La correspondance satisfaisante obtenue entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux confirme la validité de l'approche et du modèle d'endommagement proposés pour les conditions expérimentales considérées dans ce travail. En général la prédiction par cumul de moyens de caractérisation conduit à  $R^2$  de l'ordre de 0.7 à 0.75. L'intégration de ce modèle mécanique est une voie d'amélioration. Les prochains travaux consistent à étudier différentes essences du bois de construction.

## References

- 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), 2041–249.
- Cordebois, J. & Sidoroff, F. (1982), *Anisotropic damage in elasticity and plasticity*.
- Fichant, S., La Borderie, C. & Pijaudier-Cabot, G. (1999), 'Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures', *Mechanics of Cohesive-Frictional Material* **4**(4), 339—359.
- Grazide, C., Coureau, J.-L., Cointe, A. & Morel, S. (2018), 'Mechanical performance curves for the strength grading of maritime pine', *European Journal of Wood and Wood Products* **76**(3), 877–888.
- Lemaitre, J. & Chaboche, J.-L. (1996), 'Mécanique des matériaux solides', *Dunod, 2ème édition*.
- Lukacevic, M., Kandler, G. and 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**, 1—18.
- Perez, C. (2021), 'Fissuration en mode mixte i+ii du bois à différents teneurs en eau: expérimentation et proposition d'un modèle de courbe-r', *Thèse spécialité mécanique de l'Université de Bordeaux* p. 276.