

Détermination du module élastique transverse de la paroi cellulaire des fibres végétales par méthode inverse à partir d'un modèle éléments finis de l'essai de compression diamétrale sur fibre élémentaire

Determination of the transverse elastic modulus of the cell wall of plant fibers by inverse method using a finite element model of single fiber transverse compression test

Bilal Sabillah¹, Violaine Guicheret-Retel¹, Cédric Clévy¹, Vincent Placet¹ et Florian Boutenel¹

1 : Institut FEMTO-ST
SUPMICROTECH-ENSM, Université de Franche-Comté, CNRS
24 rue de l'Épitaphe, F-25000 Besançon, France
e-mail : bilal.sabillah@femto-st.fr, violaine.retel@univ-fcomte.fr, cedric.clevy@femto-st.fr,
vincent.placet@femto-st.fr et florian.boutenel@femto-st.fr

Résumé

Un dispositif expérimental de compression diamétrale a été récemment développé à l'Institut FEMTO-ST pour évaluer les propriétés apparentes transverses des fibres végétales élémentaires. Ces fibres, d'un diamètre généralement compris entre 5 et 20 μm , présentent une géométrie complexe, souvent marquée par la présence d'un vide central (lumen) et par une anisotropie mécanique. La détermination du module élastique transverse apparent repose actuellement sur le modèle analytique de Jawad & Ward, qui relie la force appliquée au déplacement transversal en considérant les fibres comme des structures circulaires pleines. Cependant, cette simplification peut entraîner des erreurs significatives, car elle ne prend pas en compte les spécificités géométriques des fibres végétales. Cette étude introduit une nouvelle méthode d'identification inverse basée sur un modèle éléments finis, permettant ainsi une évaluation plus précise du module élastique transverse de la paroi cellulaire des fibres végétales. En outre, elle compare deux approches : l'une utilisant une géométrie simplifiée et l'autre intégrant la géométrie réelle des fibres. L'objectif est de quantifier l'erreur induite par ces simplifications et d'améliorer la compréhension des propriétés mécaniques transverses des fibres végétales. Cette avancée vise à réduire les approximations et à mieux adapter les modèles aux spécificités des matériaux naturels étudiés.

Abstract

An experimental diametral compression device was recently developed at the FEMTO-ST Institute to evaluate the apparent transverse properties of elementary plant fibers. These fibers, with diameters generally ranging from 5 to 20 μm , exhibit complex geometries often marked by the presence of a hole (lumen) and by mechanical anisotropy. The determination of the apparent transverse elastic modulus currently relies on the analytical model of Jawad & Ward, which relates the applied force to the transverse displacement, assuming that the fibers are solid circular structures. However, this simplification can lead to significant errors, as it does not account for the real geometric specificities of plant fibers. This study introduces a new inverse identification method based on a finite element model, allowing a more precise evaluation of the transverse elastic modulus of the cell wall of plant fibers. It compares two approaches: one using a simplified geometry and the other integrating the actual geometry of the fibers. The goal is to quantify the error induced by these simplifications and to improve the understanding of the transverse mechanical properties of plant fibers. This advancement aims to reduce approximations and better adapt models to the specific characteristics of these natural materials.

Mots Clés : Fibres naturelles, Simulation numérique, Dialogue essais/calculs, Identification inverse

Keywords : Natural fibers, Numerical simulation, Test/calculation dialogue, Inverse identification

1. Introduction

1.1 Contexte scientifique

Depuis la révolution industrielle, la croissance économique et scientifique a amélioré le niveau de vie mondial, mais au prix d'une exploitation non durable des ressources et d'un impact environnemental

considérable. En particulier, dans le cas des matériaux composites, les procédés de fabrication des fibres de verre et, plus significativement, des fibres de carbone sont défavorables pour l'environnement du fait de leur consommation énergétique élevée et de leurs émissions polluantes. Pour répondre à ces défis, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les composites modernes en tant qu'alternative durable [1]. Des fibres issues de plantes comme le lin, le chanvre et l'ortie, adaptées au climat européen, sont particulièrement prisées. Renouvelables, capturant le CO₂ et biodégradables, elles réduisent la dépendance aux matériaux synthétiques tout en offrant des avantages en termes de rigidité, légèreté et amortissement. Toutefois, les fibres végétales présentent un comportement singulier en raison de leur ultrastructure complexe, avec notamment un vide central appelé lumen, et de leur anisotropie. Par conséquent, la caractérisation des propriétés mécaniques des fibres végétales est cruciale pour prédire les performances des composites qui les intègrent afin de pouvoir exploiter pleinement le potentiel de ces matériaux.

1.2 Détermination du module élastique transverse par essai de compression diamétrale

Dans ce contexte, un dispositif expérimental a été développé à l'Institut FEMTO-ST [2] afin d'évaluer directement le module élastique transverse apparent E_{app} de fibres végétales élémentaires (dont le diamètre est d'environ 20 μm) par compression diamétrale (Fig. 1).

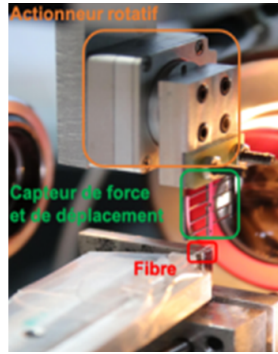


Fig. 1. Dispositif expérimental de l'essai de compression diamétrale sur fibre élémentaire

Actuellement, la détermination du module élastique transverse apparent E_{app} de la fibre repose sur une méthode inverse s'appuyant sur le modèle analytique proposé par Jawad & Ward [3], qui relie la force appliquée F_L au déplacement transverse U sous certaines hypothèses. Tout d'abord, la fibre est modélisée comme un cylindre plein homogène élastique isotrope transverse de rayon R . De plus, un état de déformation plane avec un contact de Hertz entre la fibre et les deux plateaux (supposés parallèles et rigides) est considéré. Enfin, une forte anisotropie ($E_L \gg E_T$) des fibres végétales est supposée. Ce modèle analytique s'écrit alors :

$$U = \frac{4F_L}{\pi} \left[S_{11} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{R}{b} \right) + \ln(2) \right) - \frac{1}{2} (S_{11} + S_{12}) + S_{12} \frac{R}{b} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{R}{b} \right)^2} - \frac{R}{b} \right) \right] \quad (\text{Eq.1})$$

avec b la demi-largeur de contact :

$$b = \sqrt{\frac{4F_LR}{\pi} S_{11}} \quad (\text{Eq.2})$$

où $S_{11} = \frac{1}{E_{app}}$ et $S_{12} = -\frac{\nu_{TT}}{E_{app}}$ représentent les termes du tenseur de souplesse.

Autrement dit, cette approche permet de déterminer le module élastique transverse d'une structure microscopique à géométrie complexe, module qualifié d'apparent puisqu'il correspond à celui d'une

fibres équivalentes pleines à géométrie circulaire répondant aux hypothèses du modèle de Jawad & Ward. Pour surmonter les défis liés à la complexité géométrique des fibres végétales (avec un vide central et des morphologies des contours internes et externes de la paroi complexes) et pour être en mesure de déterminer le module élastique transverse de la paroi végétale E_T (Fig. 2), une approche par identification inverse basée sur un modèle éléments finis de l'essai de compression diamétrale est proposé dans cette étude.

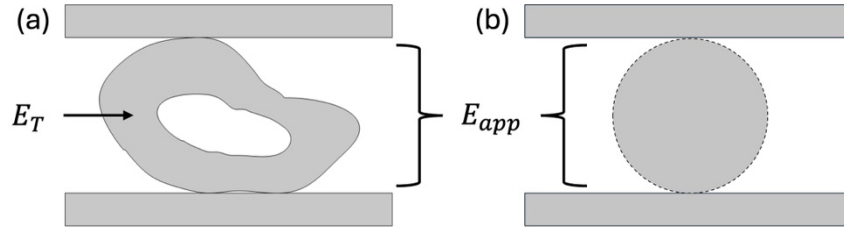


Fig. 2. (a) Définition du module élastique transverse de la paroi végétale E_T – (b) Définition du module élastique transverse apparent de la fibre E_{app} , correspondant à celui d'une fibre équivalente pleine à géométrie circulaire

2. Méthodes

2.1. Modèle éléments finis de l'essai de compression diamétrale sur fibre élémentaire

Le modèle éléments finis, réalisé avec le logiciel COMSOL Multiphysics, a été développé en s'appuyant sur les recommandations méthodologiques décrites dans [4]. En supposant que la longueur de la fibre L est significativement plus grande que sa section transversale, une approche 2D en déformation plane est adoptée. De plus, une formulation de petites déformations est utilisée pour capturer le comportement mécanique sous les conditions de charge appliquées. Le matériau de la fibre est considéré comme isotrope transverse et est modélisé comme étant purement élastique et homogène tandis que les plateaux sont considérés comme des solides indéformables. Pour le contact entre la fibre et les plateaux, une formulation lagrangienne augmentée est utilisée. Les plateaux, étant plus rigides, sont définis comme les maîtres dans la paire de contact, tandis que la fibre est l'esclave. La fibre est maillée avec des éléments triangulaires, tandis que les plateaux sont maillés avec des éléments rectangulaires. Le déplacement u_y du plateau supérieur est imposé pour atteindre $1 \mu\text{m}$ en au moins 21 itérations, permettant ainsi de déterminer la force résultante par intégration de la pression de contact exercée sur la fibre dans la zone de contact (Fig. 3). À chaque itération, la pression de contact est calculée et intégrée, ce qui permet de générer la courbe force-déplacement. Il est important de souligner que cette courbe représente ce qui est obtenu expérimentalement. C'est donc sur celle-ci que nous nous concentrons dans l'analyse, car elle constitue la donnée de référence pour l'étude des propriétés mécaniques de la fibre élémentaire testée.

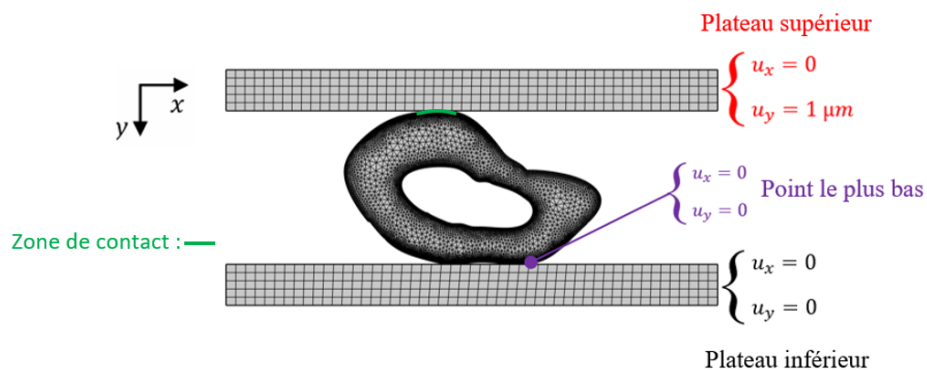


Fig. 3. Modélisation de l'essai de compression diamétrale sur fibre élémentaire par la méthode des éléments finis

2.2. Identification du module élastique transverse de la paroi végétale par méthode inverse

La méthode d'identification (Fig. 4) repose sur une fonction objectif F_{obj} qui quantifie, selon le principe des moindres carrés, l'écart entre une courbe force-déplacement de référence et celle issue du modèle numérique. L'argument de cette fonction est le module élastique transverse E_T de la paroi :

$$F_{obj} = f(E_T) \quad (\text{Eq. 2})$$

Une première simulation, réalisée dans COMSOL avec un module E_T supposé, permet de générer la courbe force-déplacement associée. Tant que l'erreur ε entre cette courbe simulée et celle de référence reste supérieure à un seuil fixé, l'algorithme *fminsearch* dans Matlab ajuste la valeur de E_T afin de minimiser la fonction objectif. Autrement dit, une interaction automatisée entre Matlab et COMSOL permet d'évaluer la valeur de E_T de manière itérative. Une fois l'optimisation aboutie, le module E_T de la paroi végétale de la fibre étudiée est ainsi déterminé.

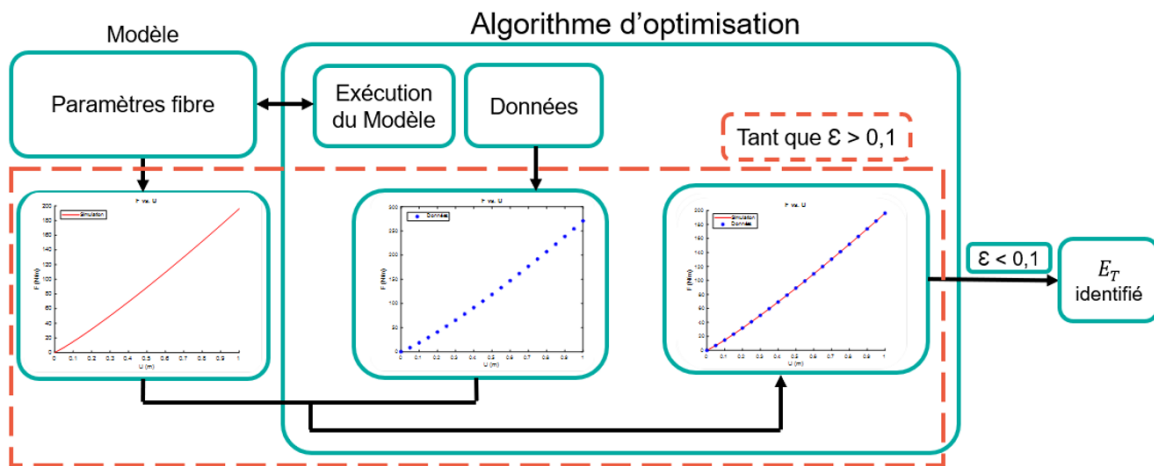


Fig. 4. Procédure d'identification inverse du module élastique transverse de la paroi végétale

En outre, cette méthodologie itérative garantit une identification précise du module E_T , exploitant la puissance des modèles numériques couplés à l'optimisation pour surmonter les limites des approches analytiques actuelles.

3. Résultats

3.1. Validation de la procédure d'identification inverse

Une courbe force-déplacement servant de référence est, tout d'abord, générée à l'aide du modèle éléments finis en considérant une géométrie réelle (Fig. 3) et un module $E_T = 1$ GPa pour la paroi végétale. Puis, la procédure d'identification est appliquée (valeur initiale donnée en entrée de l'algorithme : $E_T = 1.5$ GPa). Le module E_T ainsi identifié correspond exactement à la valeur de référence (écart résiduel : $\varepsilon = 0.0068$), ce qui valide notre procédure d'identification inverse (Fig. 5).

3.2. Effet de l'approximation de la géométrie de la fibre sur l'identification du module élastique transverse de la paroi végétale

La simplification de la géométrie de la fibre consiste à représenter la paroi externe ainsi que le lumen par des ellipses (Fig. 6). En effet, cette approximation, appliquée dans le cas du modèle de Jawad & Ward, peut aussi être envisagée soit expérimentalement suivant les méthodes utilisées pour la mesure de la section transverse soit numériquement afin de réduire la complexité du modèle et d'accélérer les calculs, tout en conservant, autant que faire se peut, les caractéristiques essentielles nécessaires à l'analyse.

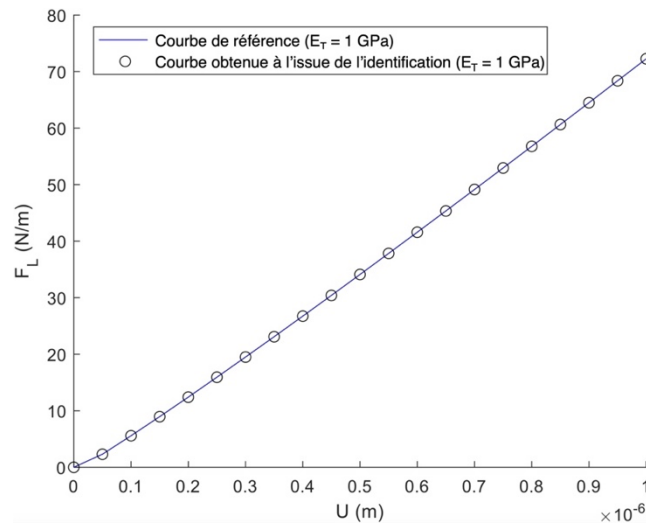


Fig. 5. Comparaison de la courbe force-déplacement obtenue à l'issue de l'identification inverse avec celle de référence dans le cas d'une géométrie réelle de fibre

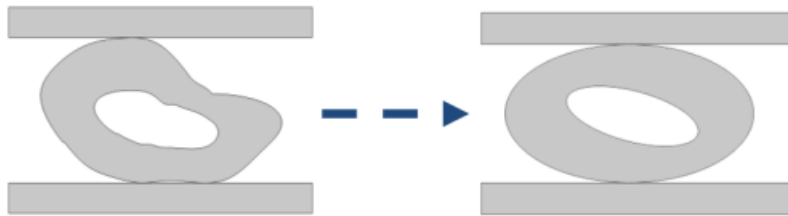


Fig. 6. Simplification de la géométrie de la fibre

La courbe de référence utilisée pour cette identification est générée à partir de la simulation éléments finis avec la géométrie réelle (plus détaillée et précise) et un module $E_T = 1$ GPa pour la paroi végétale. La procédure d'identification inverse est alors appliquée en considérant, pour la géométrie du modèle, l'approximation de la section transverse. Cette simplification géométrique entraîne une erreur significative dans l'estimation du module (Fig. 7). En effet, le module E_T de la paroi, du modèle simplifié de la fibre, identifié est de 1.25 GPa (écart résiduel : $\varepsilon = 0.0289$), soit une erreur de 25 %.

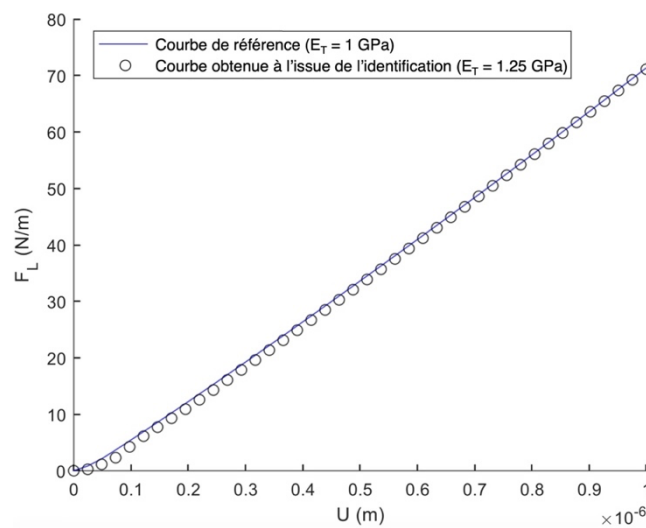


Fig. 7. Comparaison de la courbe force-déplacement obtenue à l'issue de l'identification inverse pour la géométrie simplifiée avec celle de référence pour la géométrie réelle de la fibre

4. Conclusion

Pour conclure, ce travail a permis de présenter la mise en œuvre de l'identification inverse du module élastique transverse E_T de la paroi végétale. L'étude a mis en évidence l'importance cruciale de prendre en compte la géométrie réelle de la fibre dans le modèle numérique. En effet, les résultats ont montré qu'une simplification géométrique pouvait entraîner une erreur significative de 25 % dans l'estimation du module E_T .

En considérant la géométrie réelle, il devient possible de mieux représenter les interactions mécaniques complexes au sein de la fibre, ainsi que les effets liés aux particularités de sa morphologie. Cette approche offre non seulement une meilleure précision dans les résultats obtenus, mais elle contribue également à une compréhension plus approfondie des propriétés mécaniques des fibres végétales, ce qui est essentiel pour des applications exigeant une modélisation fiable. Ces résultats soulignent ainsi l'importance d'une modélisation adaptée pour améliorer la fiabilité des prédictions et minimiser les écarts liés aux approximations géométriques.

L'identification des paramètres à partir des données expérimentales de la courbe force-déplacement pourrait être réalisée en prenant en compte les géométries transversales réelles des fibres. Une avancée significative consisterait à étendre cette identification à une géométrie tridimensionnelle réaliste des fibres, permettant ainsi une modélisation plus précise et représentative de leur comportement mécanique.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet COMFIV financé par SUPMICROTECH-ENSMM. Ils ont également été soutenus par le projet RAIDO financé dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon Europe de l'Union Européenne (accord de convention No 101135800), par la Graduate School EIPHI (contrat ANR-17-EURE-0002) et par la Région Bourgogne-Franche-Comté.

Références

- [1] A. Bourmaud, *et al.* « Towards the design of high-performance plant fibre composites », *Progress in Materials Science*, vol. 97, pp. 347–408, 2018
- [2] J. Govilas, « Plant fiber mechanical characterization with high precision micro-mechatronic means: investigation of single fiber transverse behavior and inter-fiber adhesion », Ph.D. thesis, Université Bourgogne-Franche-Comté, 2023.
- [3] S. A. Jawad, I. M. Ward, « The transverse compression of oriented nylon and polyethylene extrudates », *Journal of Materials Science*, vol. 13, n° 7, pp. 1381–1387, 1978.
- [4] J. Govilas *et al.*, « Investigating the influence of plant fiber geometry on apparent transverse elastic properties through finite element analysis », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 175, 2023.