

Diffusion de la lignine dans une microstructure synthétique du bois : modélisation numérique et analyse SHAP

N.Pistenon¹, S. Florisson¹, M. Wohlert¹, H.Yu¹

✉ *Nicolas Pistenon* nicolas.pistenon@angstrom.uu.se

¹ *Division of Applied Mechanics, Department of Materials Science and Engineering, Uppsala University, Uppsala 75121, Sweden*

Résumé — Cette étude analyse la diffusion de la lignine dans la microstructure du bois à l'aide de simulations par éléments finis sur des géométries artificielles. Une modélisation au premier ordre permet d'identifier que les paramètres de diffusion de la paroi cellulaire sont les plus influents. Une analyse SHAP révèle que la proportion de lumens est le facteur géométrique dominant. Ces résultats offrent des perspectives pour la modélisation multi-échelle et la conception d'expériences tomographiques ciblées.

Mots clés — Microstructure du bois, Diffusion de la lignine, Modélisation numérique.

1 Introduction

La délignification est une étape fondamentale dans le procédé de fabrication de la pâte à papier. La méthode de séparation de la lignine de la cellulose implique une réaction chimique en milieu alcalin, suivie d'une diffusion de la lignine hors des cellules végétales. Il est possible de préserver l'intégrité structurale du bois en contrôlant cette réaction, utile dans de nombreuses applications dans des domaines tels que la filtration de l'eau [16] ou encore le stockage d'énergie [2].

Ce processus de délignification peut être décomposé en trois étapes principales : (1) la diffusion des éléments réactifs jusqu'au site de réaction, (2) la dégradation de la lignine, et (3) la diffusion des fragments de lignine vers l'extérieur du matériau. Bien que la réaction chimique constitue le cœur du processus, c'est la diffusion de la lignine hors du matériau qui représente actuellement l'étape limitante [5]. Les parois cellulaires sont l'obstacle principal à cette diffusion [8]. Pour mieux comprendre leur rôle, Ghaffari et al. [5] ont étudié la diffusion effective de la lignine à travers des membranes de cellulose reproduisant la microstructure des parois cellulaires.

Dans notre étude, on s'intéresse à l'impact de l'organisation spatiale de la microstructure du bois, notamment la distribution entre les parois cellulaires et les lumens, ainsi qu'aux propriétés des matériaux sur la diffusion de la lignine. Les parois cellulaires sont définis ici comme l'ensemble formé par les différentes couches (primaires et secondaires) de parois et de la lamelle moyenne, c'est-à-dire l'ensemble tous les composants séparant les lumens.

Afin de quantifier l'impact de la géométrie microstructurale et des propriétés matériaux, des simulations éléments finis sont réalisées sur des géométries artificielles en deux dimensions dans le plan radial des fibres de bois. L'étude se concentre sur l'analyse du transport diffusif de la lignine à travers la microstructure, en postulant que la réaction chimique de dégradation s'est déjà produite lieu en amont. Pour chaque simulation, aucune évolution de la microstructure n'est prise en compte, qu'il s'agisse de transformations géométriques ou de modifications des propriétés des matériaux. Cette méthodologie permet d'isoler l'effet des paramètres géométriques et matériaux sur le processus de diffusion.

Une modélisation est proposée pour analyser l'effet de divers paramètres matériaux. Cette modélisation est complétée par une analyse SHAP permettant d'identifier les contributions relatives des variables géométriques à la diffusion de la lignine.

2 Méthodologie

2.1 Diffusion effective

Afin d'analyser la diffusion de la lignine à travers l'échantillon, la diffusivité effective est introduite ici comme une homogénéisation de la diffusion de la lignine dans le domaine. Cette diffusivité effective permet de mesurer l'impact global de la géométrie et des paramètres matériaux sur la diffusion de lignine. Pour cela, on considère le problème 1D équivalent où la lignine se diffuse à travers un domaine de taille L vers les x croissants suivant la loi première loi de Fick. La concentration est fixée à C_0 à gauche et à droite on considère que la lignine peut s'échapper librement, la concentration y est ainsi fixée à 0. Initialement, le domaine ne contient pas de lignine.

Il est alors possible d'obtenir la solution analytique à ce problème et de calculer la masse cumulée sortante par le bord droit dans le régime stationnaire :

$$M(t) \underset{(t \rightarrow +\infty)}{\sim} \frac{D_{\text{eff}} C_0 t}{L} - \frac{L C_0}{6} \quad (1)$$

Dans ce régime stationnaire, la masse totale sortante est linéaire et dépend de la diffusivité D_{eff} . Ainsi, il est possible de déterminer cette valeur de diffusivité effective par cette méthode dite du *time lag*. Cette diffusivité permet d'étudier l'influence des paramètres géométriques et matériaux sur la diffusion de la lignine à travers le domaine.

2.2 Simulations éléments finis

L'impact des différents paramètres de la microstructures du bois sur la diffusivité effective a été étudié. Ces paramètres sont de deux types : les paramètres géométriques et les paramètres matériaux.

Génération de la géométrie Les paramètres géométriques de la microstructure sont la densité de lumens, l'épaisseur des parois, la densité de pits et le diamètre des pits. Dans l'ensemble des simulations, la taille du domaine est fixée. Ainsi, les densités de lumens et de pits sont équivalentes à considérer leur nombre dans le domaine. Si la distribution des lumens dans l'espace est relativement isotrope, les pits quant à eux créent une anisotropie justifiant le caractère 2D du domaine.

Pour un set de paramètres géométriques, la distribution des lumens est générée aléatoirement suivant une implémentation d'un algorithme basé sur les diagrammes de Voronoï [1].

La génération des pits, connectivité entre deux lumens voisins, est réalisée à partir des lumens les plus proches¹. Les pits sont considérés comme étant fait du même matériau que les lumens, ainsi à travers toute cette étude, il est entendu que toute référence aux lumens fait en réalité référence aux lumens et aux pits.

La figure 1 illustre une géométrie créée avec cette méthodologie pour 49 lumens, une parois de $3 \mu\text{m}$ d'épaisseur, avec 20 pits de diamètre $5 \mu\text{m}$, et une taille de domaine de $210 \times 210 \mu\text{m}^2$.

Diffusion de masse en Abaqus Le problème de diffusion de masse est résolu avec le logiciel élément finis Abaqus en l'absence de contraintes et à température constante. Cette résolution dépend de deux paramètres matériaux : la diffusivité de la lignine dans le milieu et sa solubilité. Ces deux paramètres complémentaires permettent de définir le comportement de la lignine au sein des deux milieux.

La diffusivité correspond à la vitesse de diffusion de la lignine au sein du milieu. La solubilité quant à elle modélise la discontinuité entre les deux milieux. Dans Abaqus, la diffusion de masse est décrite par une version modifiée de la première loi de Fick mais par une version modifiée en terme de *concentration normalisée*, $\phi(\mathbf{x}, t)$:

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \frac{c(\mathbf{x}, t)}{s(\mathbf{x}, t)} \quad (2)$$

avec la loi de Fick modifiée :

$$\forall \mathbf{x}, \forall t > 0, J(x, t) = -D(\mathbf{x})s(\mathbf{x}) \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}, t) \quad (3)$$

1. La mesure de distance entre deux lumens est réalisée ici entre les centroïdes des lumens.

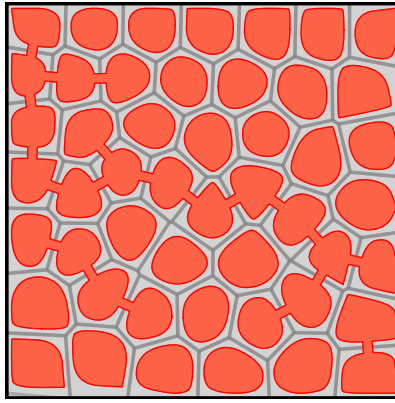


FIGURE 1 – Exemple de géométrie générée. En gris les parois, en rouge les lumens et les pits.

La concentration normalisée est ainsi une fonction continue, contrairement à la concentration qui présente des discontinuités aux interfaces. Dans le cadre de cette étude, la solubilité est envisagée non pas en tant que processus chimique, mais plutôt comme un indicateur de l’affinité relative de la lignine avec les parois et les lumens.

Les différents paramètres de la microstructure du bois sont résumés dans le tableau 1 avec leurs notations et des ordres de grandeurs issues de la littérature [7, 15, 10, 13, 4, 17].

TABLE 1 – Différents paramètres utilisés pour la définition de la microstructure du bois.

Paramètres matériaux	Diffusivité dans les parois	D_w	$10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	Diffusivité dans les lumens	D_l	$10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	Solubilité dans les parois	s_w	< 1
	Solubilité dans les lumens	s_l	1
Paramètre de la géométrie	Epaisseur des parois	w_t	$3 - 10 \text{ } \mu\text{m}$
	Nombre de lumens	N_l	$30 - 50$
	Nombre de pits	N_p	$5 - 30$
	Diamètre des pits	w_p	$3 - 10 \text{ } \mu\text{m}$

2.3 Modélisation de l’influence des paramètres matériaux

Pour mieux comprendre la dépendance de la diffusion de la lignine avec les paramètres matériaux, une modélisation au premier ordre est proposée. Cette modélisation approxime le comportement de D_{eff} observé par la simulation éléments finis à géométrie fixée en fonction des paramètres de diffusivité et de solubilité. Cette modélisation repose deux mécanismes principaux. Tout d’abord, elle définit une simplification de la géométrie permettant d’estimer l’impact des paramètres de diffusivités. D’autre part, elle introduit une courbe maîtresse pour prendre en compte l’effet de la solubilité.

Impact des diffusivités Pour modéliser l’impact des paramètres de diffusivités, une première approximation consiste à considérer une suspension de sphéroïde distribuée dans un milieu homogène sans aucune interactions entre elles. En d’autres termes, l’impact des pits est négligé et la géométrie des lumens est simplifiée. Dans ce cadre, la littérature a introduit une relation entre D_{eff} et les paramètres de diffusivités [11, 6, 3] :

$$D_{\text{eff}}(D_w, D_l) = \frac{D_w + v_l b D_w \frac{D_l - D_w}{D_l + b D_w}}{1 - v_l \frac{D_l - D_w}{D_l + b D_w}} \quad (4)$$

avec v_l la proportion de lumens dans le domaine et b un paramètre dépendant de la géométrie.

Impact de solubilité La solubilité conduit à considérer une loi de Fick modifiée (3) qui introduit un produit $D \cdot s$. Ce produit conduit naturellement à rechercher une représentation de la diffusion de la lignine dans l'espace " $D_{\text{eff}} \cdot s_{\text{eff}} - D_w \cdot s_w$ ". s_w est alors un facteur de translation horizontale et s_{eff} est un facteur de translation verticale. Dans le cas à deux matériaux, il est plus naturel de considérer le rapport entre la solubilité au sein des parois et la solubilité au sein des lumens comme facteur de translation horizontale :

$$r := \frac{s_w}{s_l} \quad (5)$$

Nous avons introduit le facteur de translation verticale s_{eff} qui peut être vu comme une solubilité effective correspondant à une vision macroscopique de la solubilité, de manière similaire à la diffusivité effective. Cette solubilité effective est définie de manière à construire une courbe maîtresse autour d'un point de référence, comme $r = 1$. Autrement dit :

$$s_{\text{eff}}(r) = \arg \min_s \text{RMSE}_{i \in \{1, \dots, N\}} \left(s \cdot D_{\text{eff}}^{D_w^{(i)}, D_l, r} - D_{\text{eff}} \left(D_w^{(i)}, D_l, r = 1 \right) \right) \quad (6)$$

avec $D_{\text{eff}}^{D_w^{(i)}, D_l, r}$ la diffusivité effective calculée à partir de la simulation élément finis pour une diffusivité au sein des parois de D_w , dans les lumens de D_l et pour le rapport de solubilité r ; $D_{\text{eff}} \left(D_w^{(i)}, D_l, r = 1 \right)$ correspondant à la valeur de diffusivité calculée par le modèle (4) pour un rapport de solubilité de 1 (point de référence).

Ainsi, la modélisation des effets des paramètres matériaux se met sous la forme suivante :

$$D_{\text{eff}}(D_w, D_l, s_w, s_l) = \frac{s_w D_w + v_l b s_w D_w \frac{s_l D_l - s_w D_w}{s_l D_l + b s_w D_w}}{\left(1 - v_l \frac{s_l D_l - s_w D_w}{s_l D_l + b s_w D_w} \right) \cdot s_{\text{eff}} \left(\frac{s_w}{s_l} \right) s_l} \quad (7)$$

Cette modélisation est discutée dans la section suivante, avec notamment l'identification du paramètre b en fonction de la géométrie ainsi que l'approximation numérique de la fonction s_{eff} .

3 Résultats et Discussions

Dans cette section il est discuté de la modélisation (7) présentée dans la section précédente, tout d'abord à travers sa dépendance en les paramètres de diffusivité, puis l'introduction de la courbe maîtresse sur la solubilité. Finalement l'impact de la géométrie sur la diffusion de la lignine dans le domaine est discuté dans la section 3.3.

3.1 Impact de la diffusivité

L'impact de la diffusivité est tout d'abord étudié à géométrie fixée et avec les solubilités dans les lumens et dans les parois fixées et égales à 1. Ainsi dans l'équation (7), la fonction $s_{\text{eff}}(r)$ est égale à 1, et seules les paramètres D_w et D_l varient. La figure 2 montre l'évolution de la diffusivité effective en fonction de D_w pour différentes valeurs de D_l . Les valeurs obtenues par la simulation éléments finis sont représentées par les croix colorées "x". Chaque couleur représente une diffusivité au sein des lumens différentes. Les traits pointillés correspondent à la réponse du modèle (7) après calibration sur les données avec en zone colorée l'intervalle de confiance à 95 % lié à l'incertitude sur le calibrage du paramètre b renvoyée par la méthode d'optimisation [14].

On observe tout d'abord que dans le cas où la diffusivité dans les lumens est bien supérieure à celle dans les parois, la diffusion de la lignine est limitée par la diffusion dans les parois. La courbe rouge, correspondant au cas où la différence est la plus importante, montre une évolution linéaire dans l'espace logarithmique entre D_w et D_{eff} . Dans ce cas, même si la présence des lumens accélère la diffusion de la lignine dans le domaine, la lignine doit tout même traverser les parois. Ainsi, dans le cas où la différence de diffusivité est très importante, la diffusion de la lignine est contrainte par les parois. Les pits peuvent, en créant une connectivité entre les lumens, faciliter la diffusion entre les lumens et donc faciliter dans une certaine mesure la diffusion dans le domaine.

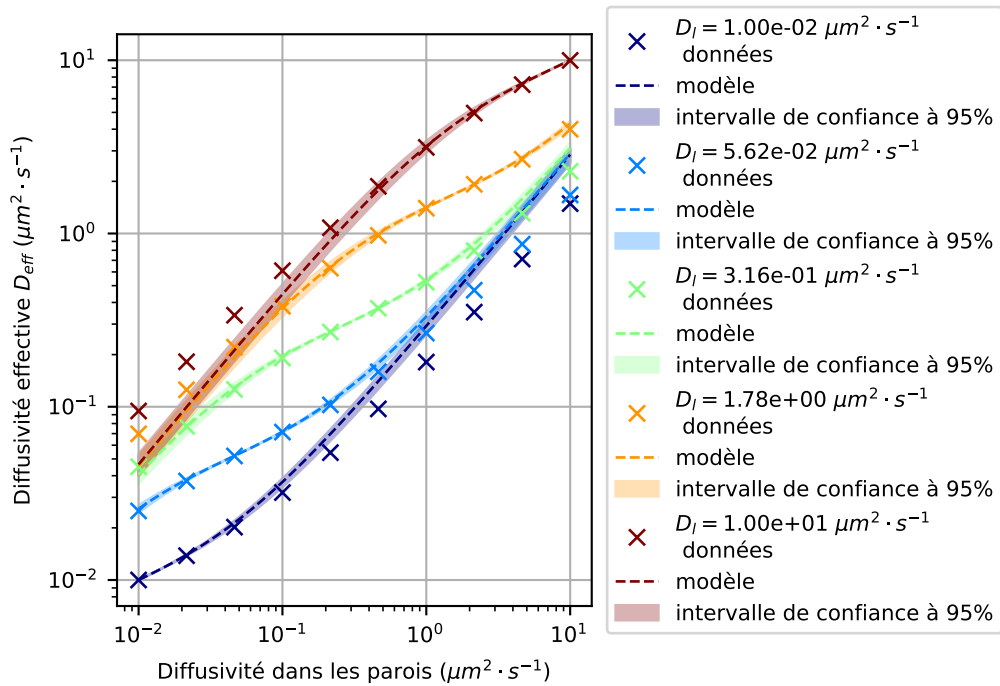


FIGURE 2 – Evolution de la diffusion de la lignine en fonction de la diffusion dans les parois pour différentes valeurs de diffusivité dans les lumens. Géométrie fixée à celle de la figure 1 et solubilités égales à 1.

Le modèle (7) reproduit bien le comportement simulé par éléments finis. Les différences les plus notables que l'on peut observer peuvent essentiellement s'expliquer par la présence des pits dans la géométrie qui ne sont pas prises en compte dans le modèle. Cependant l'approximation obtenue reste excellente avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0,97.

Dépendance géométrique de b Dans la littérature [6, 3], le paramètre b de l'équation (4) dépend directement de l'aspect ratio. Cependant, des explorations approfondies avec et sans pits ont montré que dans le cadre de cette étude, il n'y a aucune corrélation entre ce paramètre et l'aspect ratio.

3.2 Impact de solubilité

La solubilité, ou plutôt l'affinité relative de la lignine, introduite dans le modèle de diffusion de masse dans Abaqus sert ici pour modéliser les effets d'interfaces entre les deux milieux du domaine. La géométrie dans cette partie est également fixée à celle décrite dans la figure 1. La précédente valeur du paramètre b est utilisée pour construire la courbe maîtresse autour du point de référence $r = 1$ avec l'équation (6). La figure 3 montre le résultat de cette construction. La figure de gauche représente la courbe maîtresse construite dans l'espace $(r \cdot D_w) - (s_{\text{eff}} \cdot D_{\text{eff}})$. Chaque couleur représente un rapport de solubilité différent. La figure de droite représente par des croix "x" de couleurs la valeur s_{eff} utilisée pour chaque rapport de solubilité. On observe ainsi que s_{eff} semble représenter une fonction continue à seuil. On observe alors à D_w constant que pour un rapport de solubilité inférieur à 1, les lumens ayant une solubilité plus élevée, ils stockent la lignine ralentissant ainsi la diffusion dans le domaine. Plus le rapport augmente et moins les lumens stockent de la lignine, augmentant ainsi sa diffusion. Ce phénomène atteint un pic pour un rapport de 1. Pour des rapports supérieurs à 1, la diffusion de la lignine diminue de nouveau. En effet, dans ce cas, la lignine ayant une plus grande affinité avec les parois va chercher à éviter les lumens qui vont agir comme des obstacles à la diffusion. Ce phénomène peut être attribué à la tortuosité de la microstructure induite par la présence des lumens.

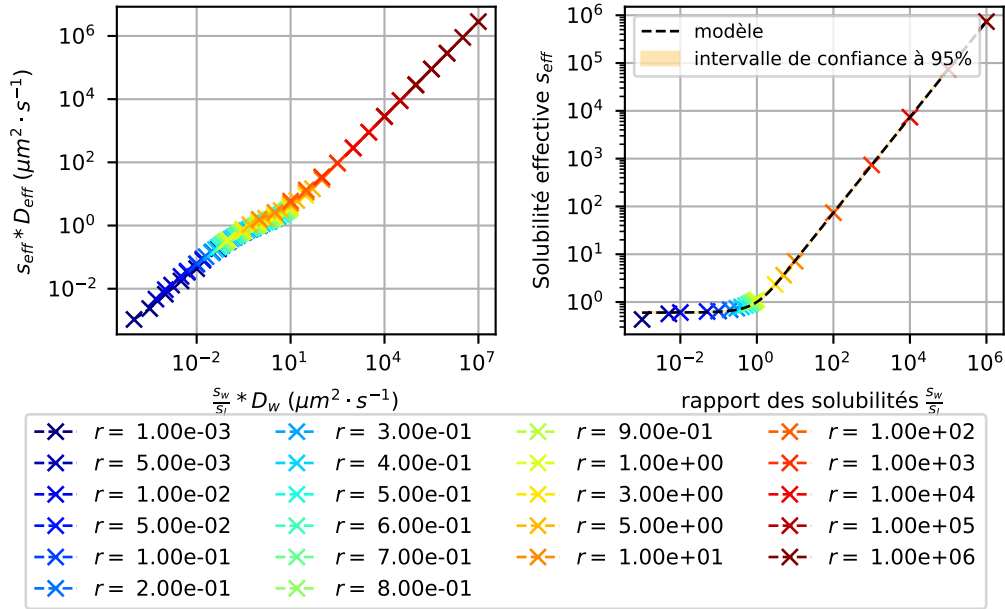


FIGURE 3 – Définition de la solubilité effective s_{eff} . A gauche, la courbe maîtresse construite avec $r = 1$ comme point de référence. A droite, fonction s_{eff} obtenue.

Pour modéliser l'efficacité effective, il est utilisé la fonction suivante :

$$\begin{cases} s_{\text{eff}}(r) = Ar + Be^{-\beta r} \\ s_{\text{eff}}(r = 1) = 1 = A + Be^{-\beta} \end{cases} \quad (8)$$

Des explorations plus approfondies ont permis de montrer que cette fonction s'écrit avec seulement un paramètre β :

$$s_{\text{eff}}(r) = (1 - v_l e^{-\beta}) r + v_l e^{-\beta r} \quad (9)$$

avec v_l la proportion de lumens dans le domaine. Cette fonction est calibrée à partir des données obtenues sur la figure 3 et est représentée en trait continu noir sur la figure de droite. L'intervalle de confiance à 95 % lié à la détermination du paramètre β y est représenté par la zone colorée orange.

Cette interprétation de l'affinité relative dans l'équation de Fick modifiée (3) est ainsi très précise et permet d'obtenir une excellente modélisation de ces paramètres sur la diffusion de la lignine dans le domaine.

3.3 Effet de la géométrie

L'équation (7) modélise l'effet des paramètres de diffusivités et de solubilités sur la diffusivité effective. Cette modélisation dépend notamment de deux paramètres, b et β , en plus de l'effet de la proportion de lumens déjà identifié dans la modélisation. Aucune corrélation claire entre ces deux paramètres et les paramètres de la géométrie n'a pu être identifiée. De plus, on observe une variabilité quand à la mesure de D_{eff} entre des expériences ayant les mêmes paramètres géométriques. En effet, la construction de la géométrie repose en partie sur des constructions aléatoires pouvant donner des tortuosités apparentes différentes.

Analyse SHAP Une analyse SHAP (SHaply Additive exPLANations) [9] a été conduite sur un modèle de random forest. Celui-ci a été entraîné sur un ensemble de 600 paramètres géométriques distincts. Ces derniers ont été choisis selon la méthode de Latin Hypercube Sampling (LHS) [12]. De plus, chaque ensemble de paramètres a été utilisé pour générer 10 géométries différentes, donnant finalement un ensemble de 6 000 simulations éléments finis avec les mêmes paramètres matériaux fixés. Ces 10 géométries ont permis d'obtenir une valeur moyenne de D_{eff} , et de la proportion de lumens obtenue.

La figure 4 illustre l'analyse SHAP obtenue sur le modèle de random forest entraîné (coefficient de corrélation de $R^2 = 0,992$ sur les données de test). On observe ainsi que la proportion de lumens est

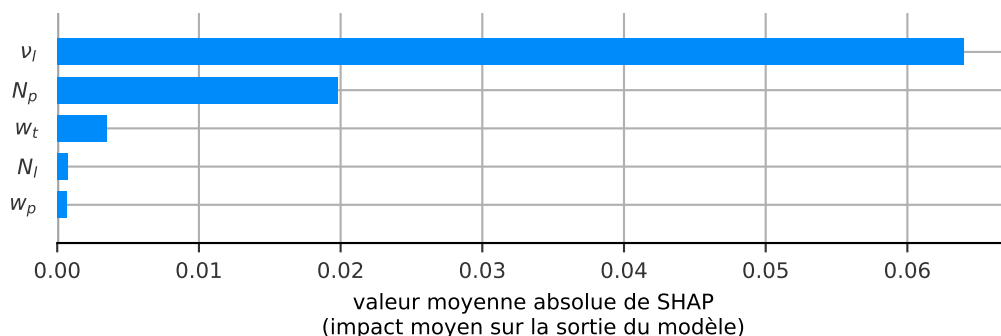


FIGURE 4 – Analyse SHAP effectuée sur un modèle de random forest entraîné avec différentes géométries.

le facteur le plus important pour modéliser l’impact de la géométrie sur la diffusion de la lignine. Ce paramètre a déjà été pris en compte dans le modèle proposé (7). Le nombre de pits est le deuxième facteur le plus important. Les pits jouent en effet un rôle crucial dans l’établissement d’une connectivité entre les lumens. Lorsque l’affinité de la lignine pour les lumens est élevée et que la diffusivité dans les lumens est grande², la diffusion de la lignine dans le domaine s’en trouve accélérée.

4 Conclusions et perspectives

Cette étude a permis d’identifier les facteurs clés gouvernant la diffusion de la lignine au sein de la microstructure du bois. Une modélisation au premier ordre a été développée pour décrire l’influence des propriétés matériaux, basée sur deux paramètres liés à la géométrie. Dans les conditions simulées (bois imprégné d’une solution de NaOH classique du procédé Kraft [15]), la diffusivité de la lignine est estimée à environ $10^{-1} \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans les parois cellulaires, contre $1 \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans les lumens. Par ailleurs, l’affinité de la lignine est plus élevée dans les lumens que dans les parois. Dans ces conditions, la modélisation (7) met en évidence l’importance prépondérante des propriétés des parois cellulaires sur le comportement diffusif global, tandis que les paramètres des lumens peuvent être estimés de manière moins fine.

L’analyse SHAP, complétée par des analyses de corrélations, a permis d’évaluer l’influence des paramètres géométriques. La proportion de lumens apparaît comme étant le facteur le plus déterminant, alors que la distribution spatiale joue un rôle secondaire. Ce résultat apporte des indications précieuses pour les futures études s’appuyant sur des reconstructions tomographiques, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale requise.

Ce travail repose cependant sur des simulations 2D dans le plan radial aux fibres, avec une microstructure figée et un transport simple de la lignine. Des travaux en cours étendent l’approche à des géométries 3D, intégrant la diffusion le long de l’axe longitudinal aux fibres. Par ailleurs, la délignification entraîne des modifications progressives de la microstructure (géométrie et propriétés matériaux), qu’il convient de modéliser. Enfin, la lignine elle-même constitue une famille hétérogène de polymères aromatiques tridimensionnels, dont les propriétés de diffusion varient selon les essences de bois. La prise en compte de cette diversité moléculaire constitue un enjeu majeur pour les futures modélisations.

Références

- [1] Franz AURENHAMMER. “Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure”. en. In : *ACM Computing Surveys* 23.3 (sept. 1991), p. 345-405.

2. Ce cadre est celui que l’on retrouve lors de la délignification étudiée.

- [2] Chaoji CHEN, Shaomao XU, Yudi KUANG, Wentao GAN, Jianwei SONG, Gegu CHEN, Glenn PASTEL, Boyang LIU, Yiju LI, Hao HUANG et Liangbing HU. “Nature-Inspired Tri-Pathway Design Enabling High-Performance Flexible Li-O₂ Batteries”. en. In : *Advanced Energy Materials* 9.9 (mars 2019), p. 1802964.
- [3] John CRANK. *The mathematics of diffusion*. eng. 2. ed., reprint. Oxford : Clarendon Press, 1976.
- [4] Roujin GHAFARI. “Mass transport in wood disintegration : implications for the pulp and paper industry”. Thèse de doct. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2023.
- [5] Roujin GHAFARI, Henrik ALMQVIST, Alexander IDSTRÖM, Ioanna SAPOUNA, Lars EVENÄS, Gunnar LIDÉN, Martin LAWOKO et Anette LARSSON. “Effect of alkalinity on the diffusion of solvent-fractionated lignin through cellulose membranes”. en. In : *Cellulose* 30.6 (avr. 2023), p. 3685-3698.
- [6] R. L. HAMILTON et O. K. CROSSER. “Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems”. en. In : *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 1.3 (août 1962), p. 187-191.
- [7] Björn HANNRUP, Christine CAHALAN, Guillaume CHANTRE, Michael GRABNER, Bo KARLSSON, Isabelle Le BAYON, Gwynn Lloyd JONES, Ulrich MÜLLER, Helena PEREIRA, José Carlos RODRIGUES, Sabine ROSNER, Philippe ROZENBERG, Lars WILHELMSSON et Rupert WIMMER. “Genetic parameters of growth and wood quality traits in *Picea abies*”. en. In : *Scandinavian Journal of Forest Research* 19.1 (fév. 2004), p. 14-29.
- [8] Patric KVIST, Erich SCHUSTER, Niklas LORÉN et Anders RASMUSON. “Using fluorescent probes and FRAP to investigate macromolecule diffusion in steam-exploded wood”. en. In : *Wood Science and Technology* 52.5 (sept. 2018), p. 1395-1410.
- [9] Scott M LUNDBERG et Su-In LEE. “A Unified Approach to Interpreting Model Predictions”. In : *Advances in Neural Information Processing Systems*. Sous la dir. d'I. GUYON, U. Von LUXBURG, S. BENGIO, H. WALLACH, R. FERGUS, S. VISHWANATHAN et R. GARNETT. T. 30. Curran Associates, Inc., 2017.
- [10] Sven-Olof LUNDQVIST et Sabine ROSNER. “Towards efficient models for hydraulic conductivity in conifer wood. Part 1 : estimation of sizes and numbers of bordered pits”. en. In : *Holzforschung* 79.1 (jan. 2025), p. 30-45.
- [11] James Clerk (1831-1879). Auteur du texte MAXWELL. *A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1 / by James Clerk Maxwell,...* eng. Clarendon press (Oxford), 1873.
- [12] M. D. MCKAY, R. J. BECKMAN et W. J. CONOVER. “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output From a Computer Code”. en. In : *Technometrics* 42.1 (fév. 2000), p. 55-61.
- [13] Jari SIRVIÖ et Petri KÄRENLAMPI. “Distributions and correlations of softwood fiber properties within age-classified pulps”. In : *Wood and Fiber Science* 29.2 (avr. 1997), p. 178-188.
- [14] K. W. VUGRIN, L. P. SWILER, R. M. ROBERTS, N. J. STUCKY-MACK et S. P. SULLIVAN. “Confidence region estimation techniques for nonlinear regression in groundwater flow : Three case studies”. en. In : *Water Resources Research* 43.3 (mars 2007), 2005WR004804.
- [15] Ahmed WAGIH, Merima HASANI, Stephen A. HALL, Vladimir NOVAK et Hans THELIANDER. “*In situ* microstructural evolution of spruce wood during soda pulping using synchrotron X-ray tomography”. en. In : *Holzforschung* 76.7 (juill. 2022), p. 611-621.
- [16] Ming-Bang WU, Yong-Ming HONG, Chang LIU, Jing YANG, Xin-Ping WANG, Seema AGARWAL, Andreas GREINER et Zhi-Kang XU. “Delignified wood with unprecedented anti-oil properties for the highly efficient separation of crude oil/water mixtures”. en. In : *Journal of Materials Chemistry A* 7.28 (2019), p. 16735-16741.
- [17] Yangsu ZHU, Lingfeng YANG, Wenjuan WU, Zhiguo WANG et Yongcan JIN. “Complete Dissolution of Ball-Milled Masson Pine Using an Aqueous Sodium Hydroxide Solvent”. In : *BioResources* 11.3 (mai 2016), p. 6017-6025.