

De l'image de bois de bout à l'estimation du comportement hygromécanique

Note scientifique de synthèse — démonstrateur image $\rightarrow$ orientation locale $\rightarrow$ modèle
EF orthotrope 2D

Philippe De Brabander

25 mars 2026

Résumé

Cette note présente un démonstrateur reliant analyse d'image et modélisation hygromécanique pour estimer, à partir d'une image de bois de bout, une base directionnelle locale exploitable dans un modèle éléments finis orthotrope 2D. Le verrou principal du projet est l'absence de données réelles annotées contenant non seulement des frontières de cernes, mais aussi des champs d'orientation physiquement cohérents. Pour contourner cette limite, un corpus synthétique de 12 000 images 512×512 de bois de bout a été généré pour quatre essences d'intérêt en menuiserie en France — chêne, hêtre, douglas et frêne — avec vérités terrain associées : orientation locale, masques de cernes, gradients de croissance, moelle éventuelle, nœuds, fissures et rayons médullaires.

Une unique brique d'apprentissage principale a été développée : un réseau multi-tâches de type ResNet34 U-Net, noté *RingMTLNet*, qui prédit l'orientation locale ainsi que deux cartes auxiliaires liées à la structure des cernes. Le choix de l'orientation comme variable centrale répond à une motivation mécanique et méthodologique : cette information est plus directement exploitable dans le modèle EF que la segmentation complète des cernes, et peut souvent être prolongée par continuité spatiale même dans des zones floues ou ambiguës. Le réseau apprend ainsi une direction locale, mais non la phase exacte du motif périodique des cernes.

Le champ directionnel reconstruit est ensuite injecté dans un modèle EF radial-tangiel soumis à une variation hydrique effective. L'intérêt du démonstrateur est double : proposer un outil d'aide à l'interprétation pour des acteurs du bois, et constituer une base méthodologique crédible pour des travaux de validation expérimentale et de partenariat recherche.

1 Contexte et objectif

Le bois est un matériau hygroscopique et fortement anisotrope. Lorsque sa teneur en eau varie, ses dimensions évoluent de manière différenciée selon les directions du matériau. En pratique, entre l'atelier où une pièce est conçue, usinée ou assemblée, et son environnement final d'usage, ces variations peuvent devenir fortement dimensionnantes. Elles se traduisent par des phénomènes bien connus en menuiserie et en ébénisterie : tuilage, gauchissement, voilement, ouverture de joints, déformations différentielles, voire fissuration lorsque les contraintes internes deviennent trop importantes. La capacité à anticiper ces effets constitue donc un enjeu central de conception.

Dans ce contexte, l'objectif du présent travail est de développer un outil permettant d'estimer, à partir de l'observation du matériau, les directions anatomiques qui gouvernent le retrait hygroscopique, puis d'en déduire une prédiction simplifiée du comportement mécanique. Le choix du bois de bout s'impose ici naturellement comme plan d'observation privilégié de l'anatomie du bois. Il s'agit de la coupe transverse, perpendiculaire à la direction longitudinale du matériau.

Sur ce plan s’observent le plus directement les cernes annuels, la moelle lorsqu’elle est présente dans le champ, les rayons médullaires, ainsi que l’organisation radiale–tangentielle qui structure le comportement transverse du bois.

Cette coupe est particulièrement pertinente pour l’étude du retrait, car les effets les plus dimensionnants pour la conception des ouvrages se jouent précisément dans le plan transverse. Le retrait hygroscopique y est fortement anisotrope, avec des comportements différents selon les directions radiale et tangentielle. C’est cette dissymétrie qui est à l’origine d’une grande partie des déformations observées, en particulier du tuilage et des retraits différentiels. L’idée directrice du travail est donc la suivante : lire, sur une image de bois de bout, les indices anatomiques permettant de reconstruire localement ces directions matière, puis injecter cette information dans un modèle hygromécanique afin d’estimer la réponse d’une pièce.

Une hypothèse forte intervient alors. Le passage de l’observation en coupe à la prédiction sur la pièce suppose que l’organisation lue sur le bois de bout soit représentative, au premier ordre, suivant la direction longitudinale du bois. Autrement dit, on suppose ici une invariance selon l’axe longitudinal, ce qui permet de ramener le problème à une modélisation bidimensionnelle dans le plan radial–tangentiel. Cette hypothèse simplificatrice ne prétend pas décrire toute la complexité tridimensionnelle du matériau réel, mais elle fournit un cadre cohérent pour un premier démonstrateur orienté vers l’aide à la conception.

Sur une image de bois de bout, l’organisation anatomique du matériau n’est visible qu’indirectement, à travers la géométrie des cernes. Or, la délimitation complète de ces cernes constitue une tâche difficile, encore peu robuste, car elle dépend fortement de l’essence, des conditions d’acquisition, de la préparation de surface, du contraste, ainsi que de la présence de singularités telles que les nœuds, les fissures ou les perturbations locales de croissance. La littérature récente montre que cette détection automatique est aujourd’hui faisable, mais dans des cadres expérimentaux, des types d’images et des régimes d’annotation très hétérogènes. Surtout, il n’existe pas, à ce jour, de grand jeu de données réel, abondant et finement annoté, spécifiquement conçu pour apprendre une reconstruction locale cohérente de l’orientation des cernes dans une perspective de couplage mécano-anatomique. Ce manque de données constitue un verrou méthodologique important pour l’apprentissage supervisé.

Dans ce contexte, le présent travail ne cherche pas à segmenter explicitement les cernes, car cette information est à la fois difficile à extraire robustement et non strictement nécessaire au calcul mécanique visé. L’approche proposée consiste au contraire à estimer une variable plus simple, plus continue et plus directement exploitable : la direction locale de la tangente aux cernes, à partir de laquelle peut être reconstruite une base matière cohérente avec les directions radiale et tangentielle. Le problème traité ici n’est donc pas celui d’une segmentation complète, mais celui de la reconstruction d’un champ d’orientation locale utile au calcul. Le manque de robustesse observé dans l’état de l’art est alors contourné de deux manières complémentaires : d’une part en simplifiant l’information à extraire, d’autre part en recourant à des données synthétiques contrôlées pour l’apprentissage.

Le présent travail s’appuie sur une stratégie de génération synthétique sous MATLAB. Un ensemble de 12 000 images de bois de bout artificielles est produit avec leurs données de référence associées, de manière entièrement contrôlée. Cette approche permet de disposer, sans annotation manuelle d’images réelles, d’un corpus d’apprentissage cohérent avec la variable d’intérêt, à savoir l’orientation locale de la structure anatomique. Le choix du synthétique n’est donc pas ici un simple artifice pratique : il constitue une réponse méthodologique directe au manque de données réelles exploitables.

L’objectif n’est ainsi ni de produire une simple segmentation, ni de dépendre d’une base d’images réelles annotées difficile à constituer. Il s’agit de construire une chaîne allant d’une image de

bois de bout à une estimation simplifiée du comportement hygromécanique d'une pièce, via la reconstruction d'un champ d'orientation locale cohérent avec la structure anatomique observée, en s'appuyant sur un apprentissage réalisé uniquement à partir de données synthétiques.



FIGURE 1 – Exemple d'image de bois de bout sur une section réelle de chêne, brute de sciage, telle qu'elle peut être observée en pratique avant préparation de surface. Les cernes annuels et les rayons médullaires y sont visibles à l'échelle macroscopique, dans un état de surface non idéalisé.

2 Jeu de données et stratégie d'apprentissage

2.1 Verrou de départ : manque de données réelles annotées

Le principal verrou méthodologique est l'absence de base de données réelle contenant, pour chaque image de bois de bout, une annotation fine et physiquement cohérente de l'orientation locale des cernes. Même lorsque des jeux publics existent, ils restent peu nombreux, souvent mono-espèce ou mono-domaine, et rarement accompagnés de champs directionnels exploitables mécaniquement.

2.2 Données artificielles structurées

Le projet s'appuie sur un corpus de **12 000 images carrées synthétiques de bois de bout**, de taille 512×512 , contenant ou non la moelle visible dans le champ, et représentant des configurations allant approximativement de **40 à 300 cernes**. Ce corpus a été construit pour **quatre**

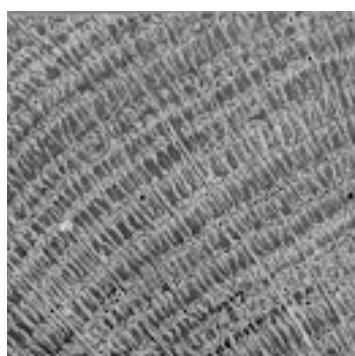
essences particulièrement présentes en menuiserie en France : chêne, hêtre, douglas et frêne.

Les champs et objets disponibles dans les données synthétiques incluent notamment l'image synthétique, l'essence simulée, la position éventuelle de la moelle, une carte d'orientation locale compacte, un masque binaire des cernes, un champ lissé des cernes (*CL*), une carte normalisée liée à la norme du gradient d'un potentiel sous-jacent (*NGP*), la présence de nœuds, de fissures et de rayons médullaires.

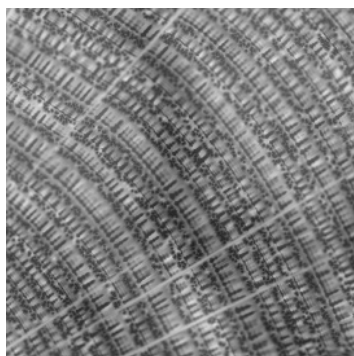
2.3 Construction des données synthétiques

La construction du corpus repose sur une logique procédurale explicite. Chaque image n'est pas obtenue par simple texturage aléatoire, mais par superposition progressive de structures géométriques et anatomiques, puis par dégradation contrôlée de l'image finale. La génération inclut notamment :

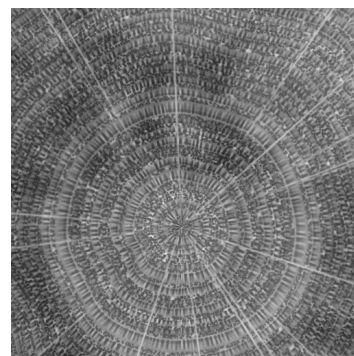
1. définition du domaine et de la moelle ;
2. génération des rayons médullaires ;
3. construction des cernes ;
4. ajout de structures fines intra-cernes ;
5. modulations de couleur et taches locales ;
6. ajout de nœuds ;
7. déformation pseudo-élastique globale ;
8. ajout de fissures ;
9. construction des vérités terrain ;
10. dégradation contrôlée et troncature finale.



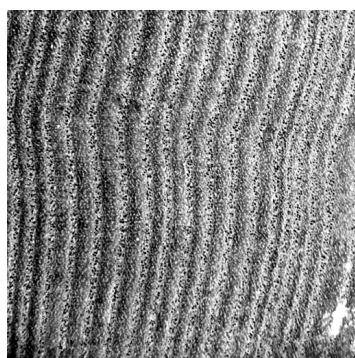
(a) Chêne — image réelle



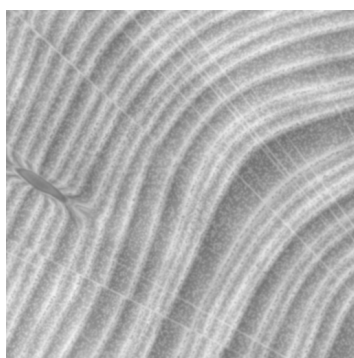
(b) Chêne — synthétique 1



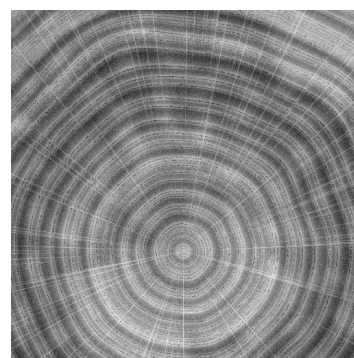
(c) Chêne — synthétique 2



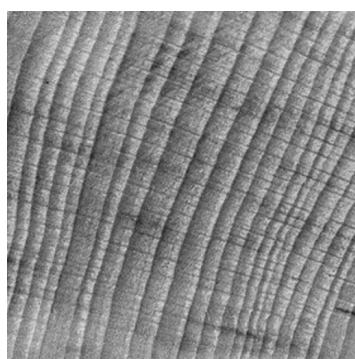
(d) Frêne — image réelle



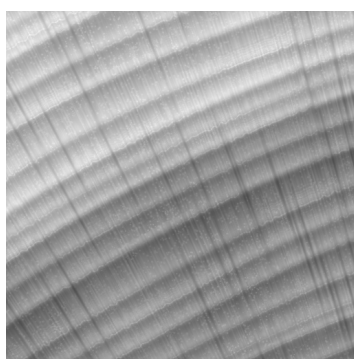
(e) Frêne — synthétique 1



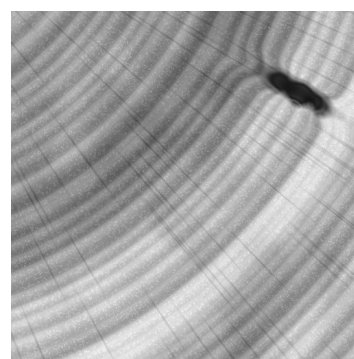
(f) Frêne — synthétique 2



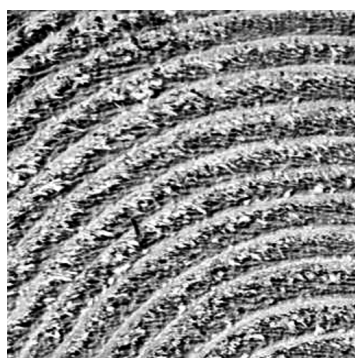
(g) Hêtre — image réelle



(h) Hêtre — synthétique 1



(i) Hêtre — synthétique 2



(j) Douglas — image réelle

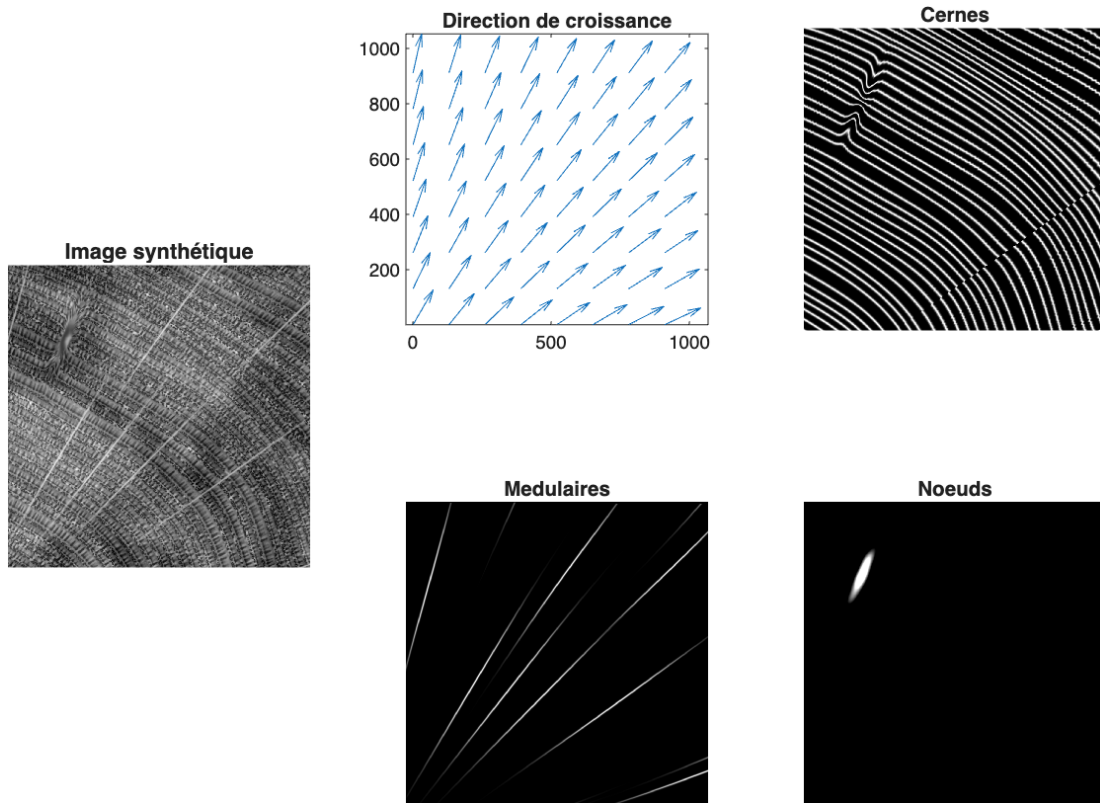


(k) Douglas — synthétique 1

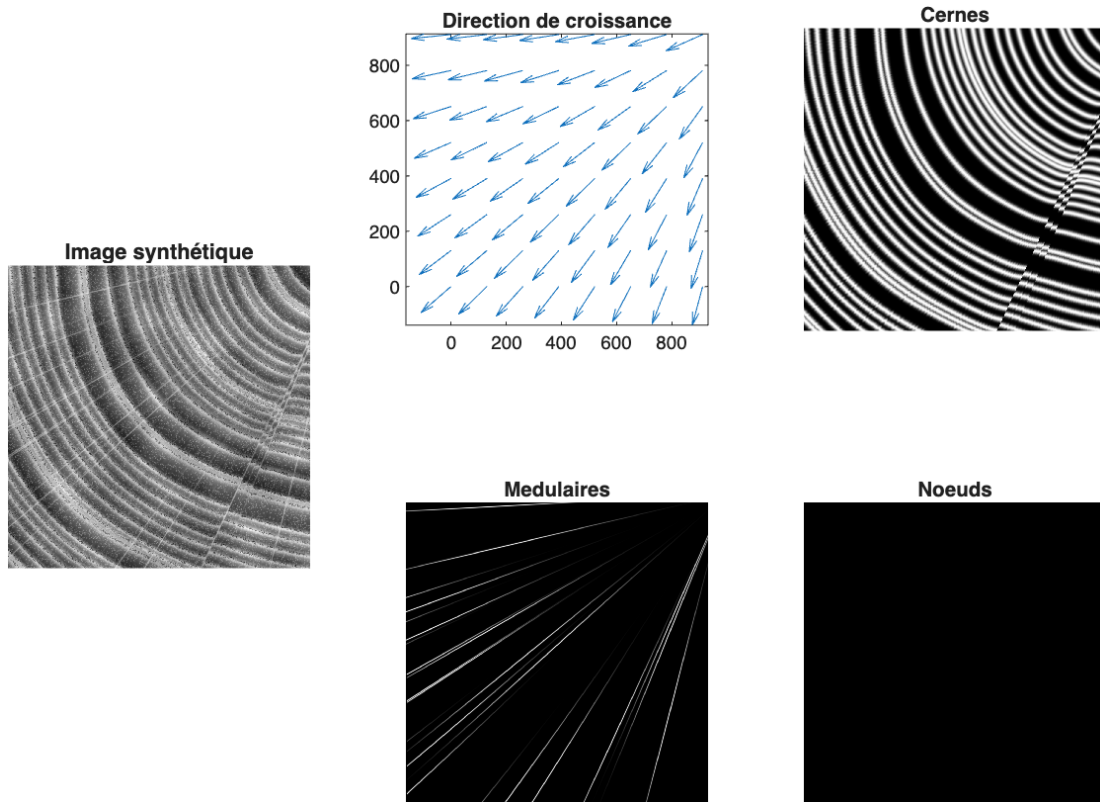


(l) Douglas — synthétique 2

FIGURE 2 — Comparaison, pour chacune des quatre essences étudiées, entre une image réelle de bois de bout et deux images synthétiques représentatives du corpus généré. Cette figure vise à montrer que les images synthétiques ne reproduisent pas seulement une organisation grossière des cernes, mais aussi des caractéristiques visuelles propres aux essences, tout en couvrant une variabilité intra-essence. Le contraste des cernes est notamment plus marqué dans le douglas et le frêne, tandis que le chêne — et dans une moindre mesure le hêtre — présentent des structures médullaires plus saillantes, qui constituent des difficultés spécifiques pour la reconnaissance d'image. L'objectif n'est pas de reproduire à l'identique une pièce réelle donnée, mais de générer des cas visuellement plausibles incorporant les difficultés anatomiques pertinentes pour l'apprentissage.



(a) Chêne - image synthétique et masques associés



(b) Frêne - image synthétique et masques associés

FIGURE 3 – Exemples, pour le chêne (a) et le frêne (b), d’une image synthétique et des cibles d’apprentissage associées utilisées dans le cadre du réseau multi-tâches.

2.4 Préparation des données

La chaîne de préparation des données est cohérente avec la génération décrite ci-dessus. Elle comprend la constitution de couples image/cibles, une troncature finale à 512×512 , puis le calcul d’une représentation directionnelle compacte par moyennage spatial en blocs pour l’apprentissage du champ d’orientation.

3 Réseaux utilisés

L’effort principal a été concentré sur la brique la plus directement nécessaire au modèle mécanique adopté : l’estimation d’un champ d’orientation local des cernes. Cette orientation locale présente un avantage méthodologique important : elle est, a priori, plus accessible que la segmentation complète des cernes. Elle ne nécessite pas de reconstruire la phase exacte du motif périodique des cernes ; seule la direction locale est recherchée.

3.1 Réseau d’orientation multi-tâches

La brique centrale du dispositif est *RingMTLNet*, une architecture multi-tâches unique de type **ResNet34 U-Net**. Il ne s’agit pas de deux réseaux séparés, mais d’un seul réseau dont l’encodeur est un ResNet34 et dont le décodeur suit une structure U-Net avec connexions de saut. À la sortie du décodeur, trois têtes sont définies :

1. **head_dir2**, qui produit un champ directionnel codé sous la forme $\cos(2\theta)$, $\sin(2\theta)$;
2. **head_cerneLisse**, qui produit la carte continue *CL* ;
3. **head_normeGrad**, qui produit la carte *NGP*.

Le réseau apprend principalement une information directionnelle locale, mais aussi des représentations continues auxiliaires de la structure des cernes. Il ne vise toutefois pas la reconstruction explicite de chaque frontière de cerne.

3.2 Formulations simplifiées et pistes exploratoires

Une version réduite du problème a d’abord été étudiée afin de tester la capacité du réseau à reconstruire uniquement l’information directionnelle utile au calcul, sans chercher à prédire l’ensemble des sorties auxiliaires. Dans cette configuration, l’image d’entrée est ramenée à une prédiction compacte de taille $8 \times 8 \times 2$, correspondant à un champ d’orientation local échantillonné à basse résolution. L’apprentissage porte alors uniquement sur cette variable directionnelle.

On note t le champ directionnel cible, correspondant à la tangente locale aux cernes, et p le champ directionnel prédit par le réseau. L’optimisation repose sur une loss cosinus entre vecteurs normalisés :

$$L_{\text{orient}} = \text{mean} \left[1 - \left\langle \frac{p}{\|p\|}, \frac{t}{\|t\|} \right\rangle \right].$$

Cette formulation permet de concentrer l’apprentissage sur la cohérence angulaire locale, indépendamment de la norme des sorties.

Les essais réalisés avec cette version simplifiée montrent que le réseau parvient déjà à reconstruire correctement l’organisation directionnelle globale du motif. Les figures associées mettent en évidence que les orientations principales sont bien retrouvées, y compris lorsque la géométrie des cernes s’écarte d’un motif purement concentrique. En revanche, cette formulation seule reste

limitée pour décrire finement la structure complète des cernes et ne suffit pas à reconstruire, à elle seule, une représentation riche de leur organisation locale.

Un autre point exploratoire important a consisté à utiliser des convolutions à grande taille de noyau, plutôt que de s'appuyer uniquement sur des empilements de petites convolutions 3×3 . Dans les essais menés ici, ce choix s'est révélé particulièrement pertinent : il améliore la cohérence spatiale des champs prédits et permet au réseau de mieux capter des structures étendues, visibles à l'échelle de plusieurs cernes. Les résultats illustrés montrent que cette augmentation de portée spatiale favorise une reconstruction plus stable et plus lisible des directions locales.

Ces essais exploratoires ont donc joué un rôle important dans la mise au point du modèle final. Ils montrent qu'une information directionnelle compacte peut déjà être apprise de manière robuste, et qu'un accroissement du champ réceptif effectif constitue un levier utile pour améliorer la qualité de cette reconstruction.

3.3 Remarque de portée

À ce stade, les résultats doivent être interprétés comme ceux d'un démonstrateur méthodologique. Ils montrent la faisabilité de la chaîne proposée et la pertinence des choix de représentation directionnelle, sans constituer encore une validation expérimentale exhaustive sur données réelles.

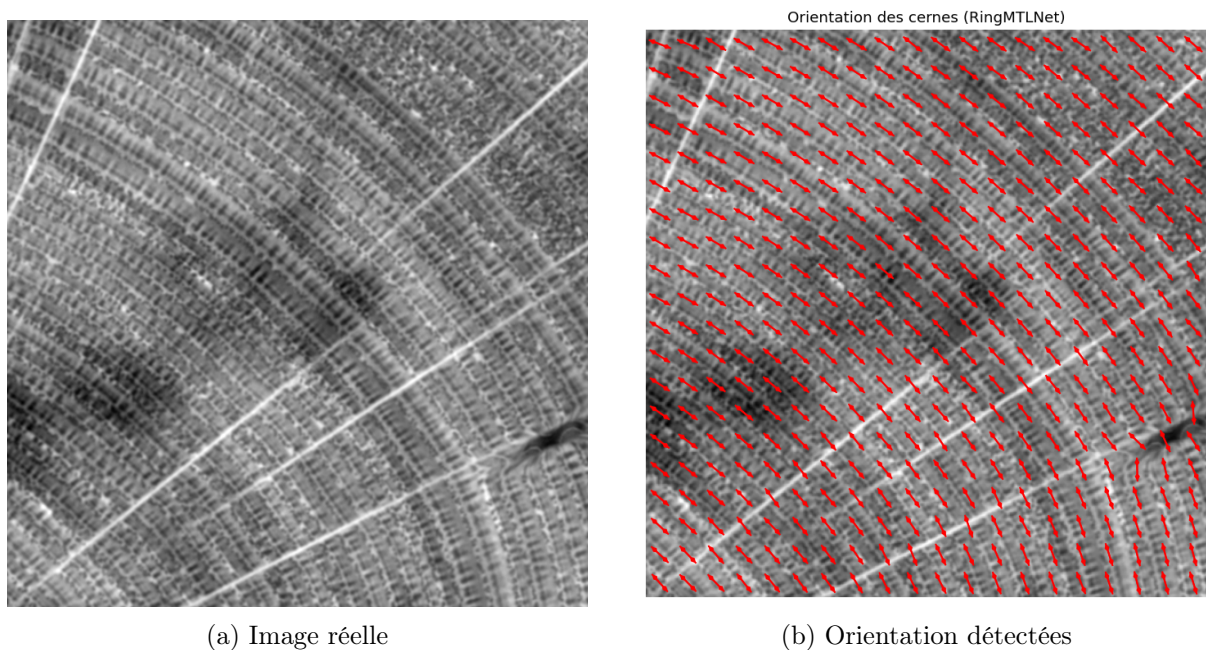


FIGURE 4 – Exemple de chaîne de reconstruction sur une image synthétique du corpus d'apprentissage.

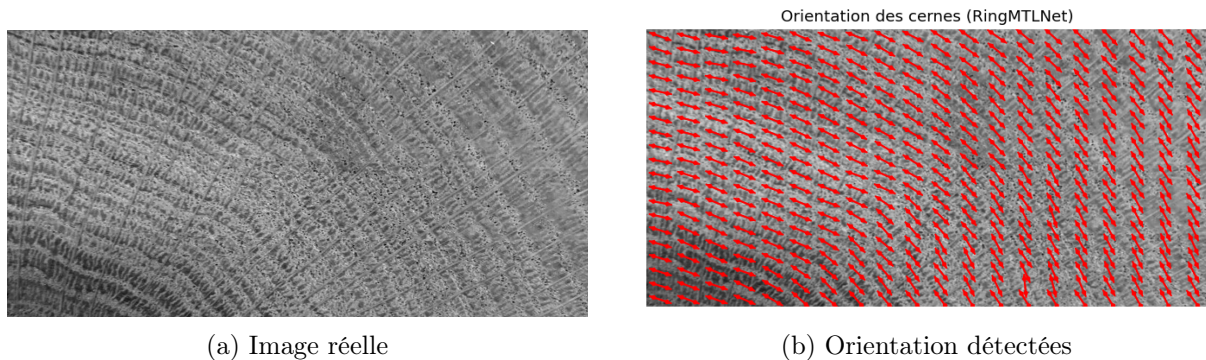


FIGURE 5 – 1er exemple de chaîne de reconstruction appliquée à une image réelle de bois de bout (chêne). À gauche : image réelle recadrée. À droite : champ d’orientation locale prédit par RingMTLNet en rouge. Cette sortie montre que le réseau reconstruit une direction cohérente des cernes à l’échelle locale, malgré la présence d’hétérogénéités anatomiques et de médullaire.

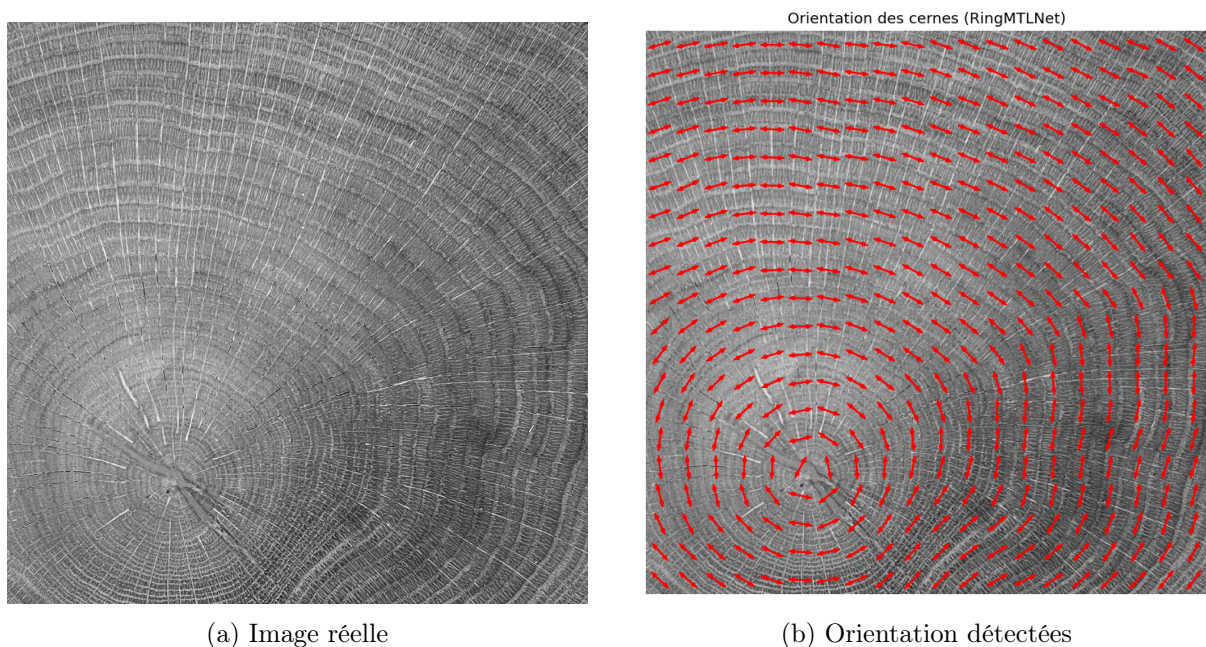


FIGURE 6 – Exemple d’image réelle de bois de bout et champ local de tangentes aux cernes. Les rayons médullaires, très visibles sur cette coupe, constituent des structures anatomiques susceptibles de créer une ambiguïté visuelle avec les cernes. Malgré cette source de confusion, le champ directionnel reconstruit demeure globalement cohérent avec leur géométrie. Cette information, plus simple et plus continue qu’une segmentation complète, constitue la variable cible retenue pour reconstruire localement une base matière exploitable dans le modèle hygromécanique.

3.4 Illustration des résultats de détection des cernes et ouverture vers la dendrométrie

Les résultats obtenus sur les cas tests réels montrent que la structure principale des cernes peut être reconstruite de manière visuellement cohérente, y compris en présence de perturbations anatomiques marquées. Les Figures 7 et 8 illustrent cette capacité sur deux exemples représentatifs. Malgré la présence de rayons médullaires très visibles, de variations locales de contraste et d’irrégularités de texture, les motifs de croissance annuels restent correctement suivis dans leur organisation globale.

À ce stade, cette évaluation doit être comprise avant tout comme une validation qualitative. Elle montre que l'approche retenue permet d'extraire une représentation exploitable de la structure des cernes sur des images réelles, sans que l'apprentissage n'ait reposé sur une base abondante de données réelles annotées. Ce point est important, car il confirme l'intérêt du choix méthodologique adopté ici : simplification de la variable cible, recours à des données synthétiques structurées, puis transfert vers des cas réels.

Au-delà de la finalité mécano-anatomique poursuivie dans ce travail, ces premiers résultats ouvrent également une perspective vers la dendrométrie. En effet, la capacité à suivre automatiquement l'organisation des cernes sur une coupe transversale constitue une brique potentiellement utile pour des tâches telles que l'estimation de la croissance radiale, l'analyse de régularité des cernes ou l'extraction semi-automatique d'informations de structure. Le présent travail ne vise pas directement une exploitation dendrométrique ou dendrochronologique au sens strict, mais il montre qu'une base méthodologique commune peut exister entre ces domaines et l'objectif ici poursuivi de reconstruction d'une information anatomique utile au calcul.

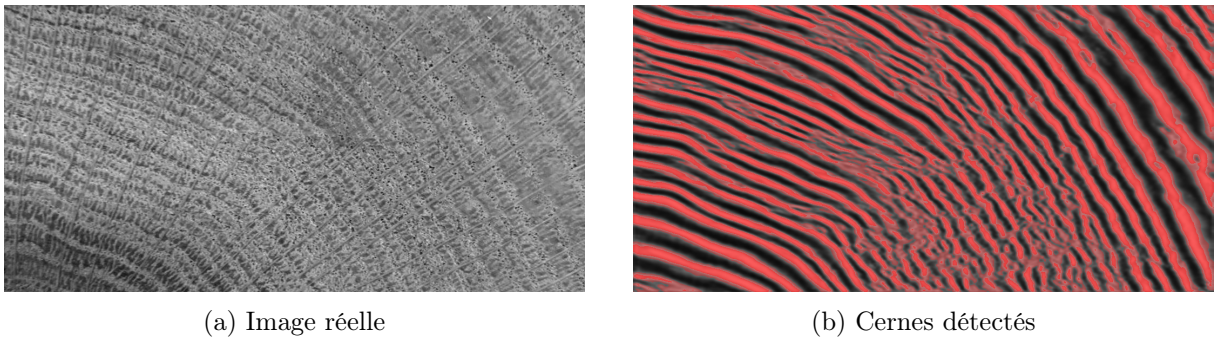


FIGURE 7 – Exemple de cas test réel. À gauche : image de bois de bout. À droite : image des cernes détectés. Malgré la présence de rayons médullaires marqués et d'une texture locale complexe, la structure principale des cernes reste correctement reconstruite.

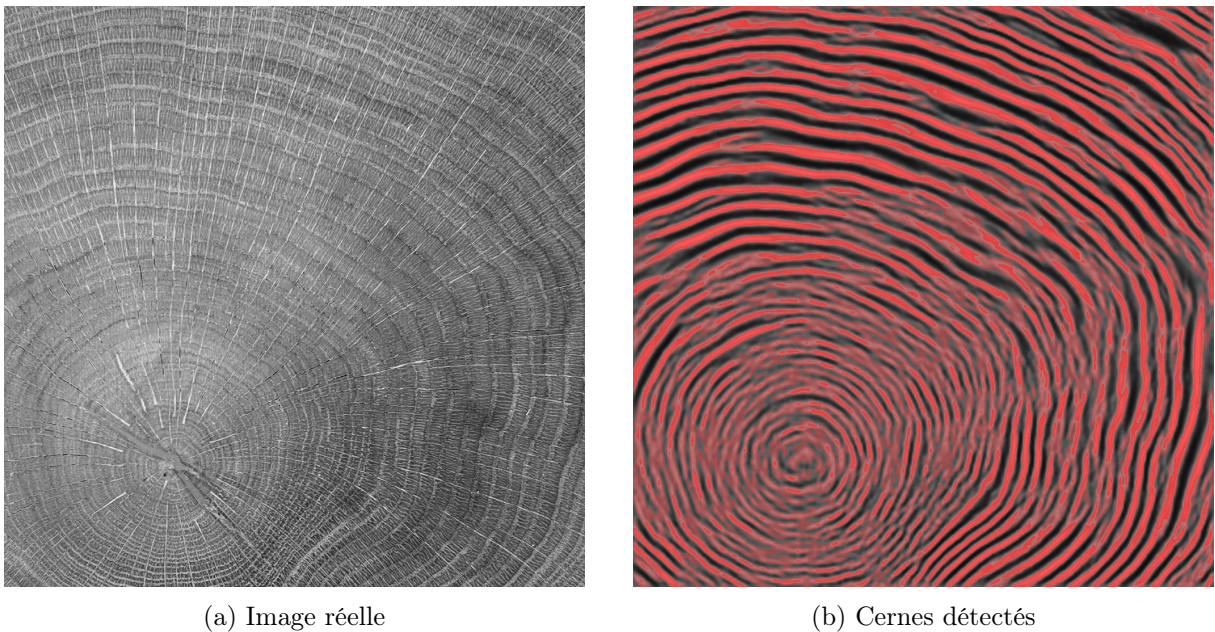


FIGURE 8 – Exemple de cas test réel. À gauche : image de bois de bout. À droite : image des cernes détectés. Malgré la présence de rayons médullaires marqués et d'une texture locale complexe, la structure principale des cernes reste correctement reconstruite.

4 Modèle hygromécanique associé

4.1 Modèle mécanique orthotrope 2D

4.1.1 Domaine, hypothèses cinématiques et équations d'équilibre

On considère une pièce de bois décrite dans le plan transverse du bois de bout, repéré par les coordonnées globales (x, y) . La direction longitudinale du bois est hors du plan. Le modèle retenu est un modèle 2D en **contraintes planes** dans le plan transverse, ce qui revient à supposer que la contrainte hors plan selon l'axe longitudinal reste négligeable, autrement dit que $\sigma_{zz} \approx 0$.

Le modèle fait également l'hypothèse d'une **invariance suivant l'axe longitudinal** z , au sens où la structure observée sur la coupe est supposée représentative, au premier ordre, de l'état local du matériau sur une épaisseur suffisante dans cette direction.

Le champ de déplacement est noté $\mathbf{u}(x, y) = [u(x, y), v(x, y)]^T$. Le tenseur des petites déformations planes associé est noté $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$, et, en écriture vectorielle plane, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}]^T$.

En l'absence de forces volumiques, l'équilibre statique s'écrit sous la forme $\text{div } \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}$ dans Ω .

4.1.2 Orthotropie locale radial-tangentielle

Le bois est modélisé comme un matériau **orthotrope local** dans une base matière (r, t) , où r désigne la direction radiale locale et t la direction tangentielle locale. Dans cette base :

$$\boldsymbol{\sigma}_{rt} = \mathbf{C}_{rt} (\boldsymbol{\varepsilon}_{rt} - \boldsymbol{\varepsilon}_{rt}^h).$$

La matrice de comportement locale s'écrit

$$\mathbf{C}_{rt} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix},$$

avec

$$Q_{11} = \frac{E_r}{1 - \nu_{rt}\nu_{tr}}, \quad Q_{22} = \frac{E_t}{1 - \nu_{rt}\nu_{tr}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{tr}E_r}{1 - \nu_{rt}\nu_{tr}} = \frac{\nu_{rt}E_t}{1 - \nu_{rt}\nu_{tr}}, \quad Q_{66} = G_{rt}.$$

4.1.3 Chargement hygromécanique

La grandeur réellement utilisée dans le code n'est pas directement l'humidité relative de l'air, mais un **paramètre effectif de variation hydrique du matériau**, noté $\Delta\alpha$, implémenté dans le code par la variable `dAlpha`. Dans la base locale (r, t) , la déformation hygroscopique propre est écrite sous la forme

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{rt}^h = [\beta_r, \beta_t, 0]^T \Delta\alpha.$$

4.1.4 Formulation faible et discrétisation EF

Pour chaque élément, la formulation discrète suit le schéma standard

$$\mathbf{K}_e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C}_{xy} \mathbf{B} d\Omega, \quad \mathbf{F}_e^h = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C}_{xy} \boldsymbol{\varepsilon}_{xy}^h d\Omega.$$

Le système global assemblé s'écrit alors

$$\mathbf{KU} = \mathbf{F}^h.$$

4.2 Identification des paramètres locaux à partir des données issues du modèle

Le modèle mécanique précédent suppose connus, en chaque point ou en chaque élément, une direction locale radial-tangentielle, des constantes matériau associées à l'essence, un paramètre de chargement hydrique et la géométrie de la pièce dans le plan étudié.

Les sorties du réseau et de la reconstruction fournissent un champ d'orientation compact `ori`, une carte `norm_grad`, une carte lissée `cl`, et éventuellement une reconstruction d'isocourbes via le potentiel ϕ .

4.3 Paramètres matériau bibliographiques pour les quatre essences considérées

Le modèle hygomécanique introduit ci-dessus suppose connus, pour chaque essence étudiée, un jeu minimal de paramètres matériau. Dans le cadre du présent démonstrateur, on retient des valeurs bibliographiques de première approximation pour les quatre essences considérées : chêne (*Quercus robur* / *Q. petraea*), hêtre (*Fagus sylvatica*), frêne (*Fraxinus excelsior*) et douglas (*Pseudotsuga menziesii*).

L'objectif n'est pas ici de proposer un jeu exhaustif de constantes orthotropes locales identifiées expérimentalement, mais de disposer d'ordres de grandeur cohérents pour alimenter le modèle 2D radial-tangentiel. Les propriétés retenues sont donc : la masse volumique à 12 % d'humidité, les retraits totaux radial et tangentiel de l'état vert à l'état anhydre, ainsi que quelques grandeurs mécaniques globales usuelles servant de repères matériau. Les valeurs rassemblées dans le tableau 1 ne doivent pas être lues comme un jeu complet de constantes matériau identifiées pour un modèle prédictif. Elles constituent uniquement une base bibliographique de premier niveau pour raisonner sur le comportement du bois de bout dans le plan radial-tangentiel. Les données disponibles dans la littérature sont en effet hétérogènes : elles dépendent fortement de l'humidité, de la densité, de l'origine du bois, du protocole d'essai et, pour certaines grandeurs comme le cisaillement radial-tangentiel, de la définition même de la grandeur mesurée (cisaillement plan, rolling shear, seuil de plasticité ou rupture). En conséquence, les valeurs retenues ici doivent être comprises comme des ordres de grandeur utiles à la modélisation exploratoire, et non comme des valeurs de dimensionnement.

TABLE 1 – Valeurs indicatives de travail dans le plan radial–tangential pour les quatre essences étudiées. Ces valeurs ne constituent pas des données de dimensionnement ; elles servent uniquement de base bibliographique de premier niveau pour le démonstrateur.

Propriété	Chêne	Hêtre	Frêne	Douglas
E_r [MPa]	1600	1510	1510	840
E_t [MPa]	880	730	760	620
G_{rt} [MPa]	<i>ordre de grandeur 300–500</i>	380	380	87
$f_{t,r}$ [MPa]	8.7	19.5	12.5	approx. transverse
$f_{t,t}$ [MPa]	4.9	8.9	8.3	globale ~ 2.1
$f_{c,r}$ [MPa]	11.1	11.0	10.5	approx. transverse
$f_{c,t}$ [MPa]	8.2	6.0	10.0	globale ~ 4.8
$f_{v,rt}$ [MPa]	<i>ordre de grandeur 3–5</i>	4.5	<i>ordre de grandeur 3–4</i>	1.1–1.7

Du point de vue hygromécanique, les paramètres les plus importants pour le démonstrateur sont les retraits radial et tangential. En effet, la déformation hygroscopique propre est modélisée dans la base matière locale (r, t) sous la forme

$$\varepsilon_{rt}^h = [\beta_r, \beta_t, 0]^T \Delta\alpha.$$

Dans une première approximation, les coefficients effectifs β_r et β_t peuvent être estimés à partir des retraits totaux de l'état vert à l'état anhydre, en supposant que : (i) le retrait démarre au voisinage du point de saturation des fibres, et (ii) l'évolution de la déformation libre avec la teneur en humidité reste approximativement linéaire sous ce point.

En notant H_f le point de saturation des fibres, pris ici à titre d'approximation égal à 30 %, on obtient en valeur absolue :

$$|\beta_r| \approx \frac{S_r}{H_f}, \quad |\beta_t| \approx \frac{S_t}{H_f},$$

où S_r et S_t sont exprimés en fraction. En pratique, pour une baisse de teneur en humidité, la déformation libre correspondante est contractante.

TABLE 2 – Coefficients hygroscopiques effectifs approchés, exprimés par point de teneur en humidité.

Coefficient	Chêne	Hêtre	Frêne	Douglas
$ \beta_r $ [% / %H]	0.143	0.193	0.167	0.150
$ \beta_t $ [% / %H]	0.297	0.393	0.267	0.250

Ces valeurs confirment, pour les quatre essences retenues, la dissymétrie classique entre direction radiale et direction tangentielle, la contraction tangentielle étant nettement plus élevée. Cette anisotropie de retrait constitue l'un des mécanismes principaux à l'origine du tuilage, du gauchissement, des ouvertures de joints et de certaines fissurations observées en pratique.

Le retrait longitudinal du bois normal reste généralement très faible devant les retraits radial et tangential. D'après le *Wood Handbook* du USDA Forest Products Laboratory, le retrait longitudinal total entre l'état vert et l'état anhydre est typiquement de l'ordre de 0,1% à 0,2% pour la plupart des essences. Cette composante peut donc être négligée au premier ordre dans le cadre

du présent démonstrateur, centré sur le comportement dans le plan radial–tangential. Cette hypothèse devient toutefois plus discutable en présence de bois de réaction, de bois juvénile ou de fortes déviations du fil, pour lesquels le retrait longitudinal peut devenir nettement plus élevé.

Il convient toutefois de souligner que les propriétés mécaniques reportées dans le tableau 1 restent des propriétés globales de référence. Elles ne se substituent pas à une identification complète des constantes orthotropes locales du plan radial–tangential ($E_r, E_t, G_{rt}, \nu_{rt}, \nu_{tr}$), qui serait nécessaire pour une prédiction quantitative fine. Dans la présente note, ces données doivent donc être comprises comme un socle matériau raisonnable pour un démonstrateur de premier niveau, en attendant une étape de calibration expérimentale dédiée.

Références bibliographiques associées. Les valeurs rassemblées ci-dessus proviennent principalement de fiches synthétiques européennes sur les essences tempérées, complétées par la littérature de référence sur les relations humidité–retrait du bois.

4.4 Résultats et discussion

Le modèle couplé produit trois familles principales de résultats : la déformée de la pièce sous variation hydrique imposée, les champs de contrainte dans le repère global puis local, et un indice simplifié de rupture de type contrainte maximale.

Le dispositif développé ne constitue pas encore un jumeau numérique complet de la pièce au sens strict, faute de calibration expérimentale systématique, de conditions aux limites réalistes et de boucle de mise à jour sur données réelles. En revanche, il s’apparente déjà à une première forme de jumeau numérique matière, ou plus précisément à un proto-jumeau hygromécanique 2D.

Il faut enfin souligner que le modèle repose sur une hypothèse forte : la coupe de bois de bout observée est supposée représentative, au premier ordre, du matériau suivant l’axe longitudinal. Cette invariance permet une réduction du problème à une formulation 2D dans le plan radial–tangential, adaptée à un démonstrateur exploratoire. En contrepartie, les effets tridimensionnels, les variations de fil selon la longueur et certaines hétérogénéités locales ne sont pas décrits. Les résultats doivent donc être interprétés comme des résultats qualitatifs ou semi-quantitatifs, pertinents pour l’analyse de tendances et la localisation de zones critiques, mais non comme une prédiction tridimensionnelle complète de la pièce réelle.

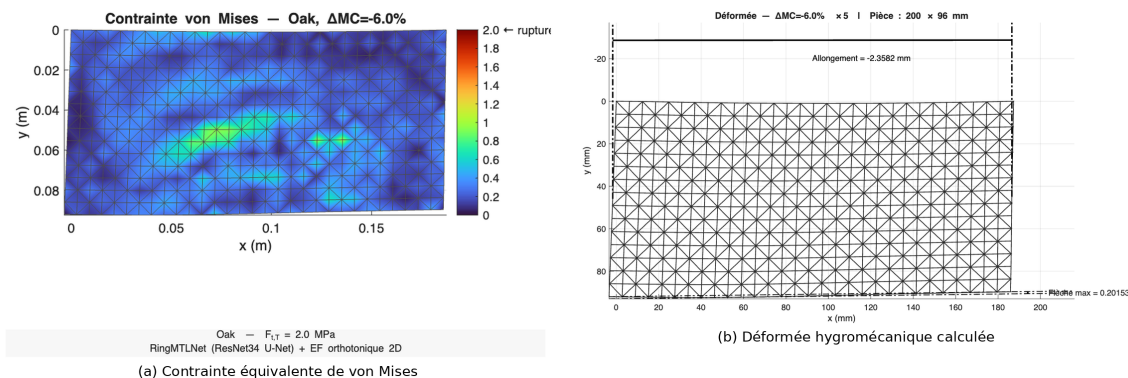


FIGURE 9 – Couplage entre orientation locale prédite et réponse mécanique 2D sur un cas réel de bois de bout figure 5. (a) Champ de contrainte équivalente de von Mises obtenu à partir du modèle orthotrope 2D alimenté par l’orientation reconstruite. (b) Déformée hygromécanique calculée pour une variation de teneur en eau de -6% . Cette figure illustre la capacité de la chaîne proposée à transformer une information anatomique issue de l’image en une estimation mécanique spatialement résolue.

5 Démonstrateur web et usages visés

Le démonstrateur web (<https://woodsim.dbebenisterie.com/app>) assemble les briques précédentes dans une interface unique : chargement d’une photo, détection du contour et recadrage, estimation de l’orientation, visualisation des cernes, choix de l’essence et des dimensions, puis animation de la déformation en fonction d’une variation hygrométrique.

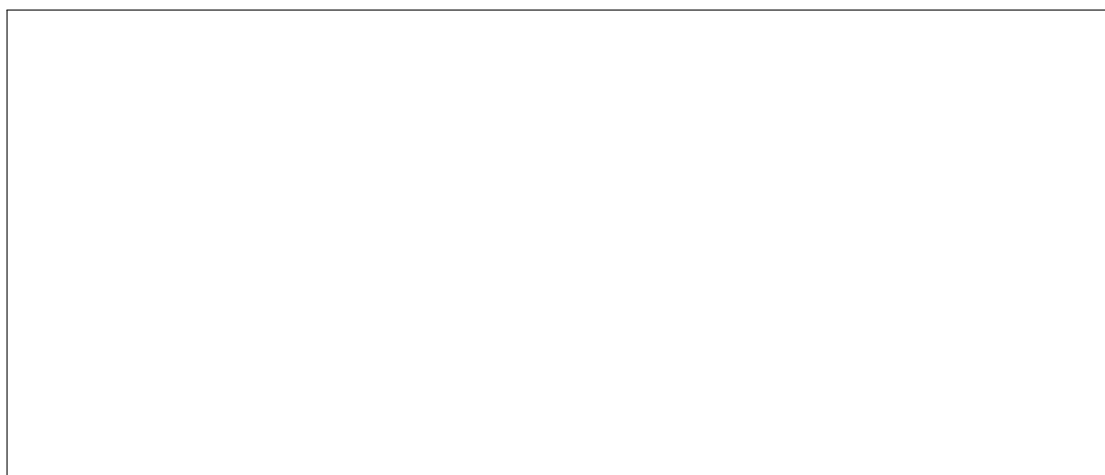


FIGURE 10 – Captures du démonstrateur web montrant l’orientation détectée, le maillage et l’animation hygrométrique.

6 Limites actuelles et perspectives

La dépendance à des données synthétiques est à la fois une force et une limite. Elle permet l’apprentissage supervisé, mais elle pose immédiatement la question du transfert vers des images réelles plus bruitées, moins régulières et souvent affectées par des artefacts de prise de vue.

Le modèle mécanique reste volontairement simplifié : pièce 2D, comportement orthotrope réduit aux directions radiale–tangentielle, variation hygrique imposée, conditions aux limites minimales. Les ordres de grandeur et la localisation des zones sensibles sont plus robustes que la précision absolue des déplacements.

7 Conclusion

Le projet montre la faisabilité d’une chaîne originale reliant image de bois de bout, reconstruction d’orientation locale et simulation hygromécanique simplifiée. Malgré l’absence actuelle de validation expérimentale étendue, le démonstrateur constitue une base sérieuse de recherche appliquée.

Mots-clés bois de bout, cernes, orientation locale, données synthétiques, U-Net, anisotropie, hygromécanique, éléments finis.

Références

- [1] Marichal, H., et al. *DeepCS-TRD, a Deep Learning-based Cross-Section Tree Ring Detector*. 2025.
- [2] Marichal, H., et al. *UruDendro, a public dataset of 64 cross-section images and manual annual ring delineations of Pinus taeda L. Annals of Forest Science*, 82, 25, 2025.
- [3] Wu, F., Huang, Y., Benes, B., Warner, C. C. *Automated tree ring detection of common Indiana hardwood species through deep learning : Introducing a new dataset of annotated images. Information Processing in Agriculture*, 11(4), 552–568, 2024.
- [4] Poláček, M., et al. *Automation of tree-ring detection and measurements using deep learning. Methods in Ecology and Evolution*, 14, 2233–2245, 2023.
- [5] Fabijańska, A., Danek, M. *A computer vision system for automatic tree-ring detection and tree-ring width measurement from scanned images of coniferous cores. Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 107–118, 2017.
- [6] Ge, M., et al. *Tree Ring Segmentation Based on Improved U-Net in X-ray CT Images of Wood. Electronics*, 12(14), 3009, 2023.
- [7] CIRAD. *Tropix 7 – Chêne*. Fiche essence, édition 2025.
- [8] CIRAD. *Tropix 7 – Hêtre*. Fiche essence, édition 2023.
- [9] CIRAD. *Tropix 7 – Frêne*. Fiche essence.
- [10] CIRAD. *Tropix 7 – Douglas*. Fiche essence, édition 2023.
- [11] Ross, R. J. (ed.). *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
- [12] proHolz Austria. *European Wood Species and their Characteristics*. Vienna : proHolz Austria, 2006.
- [13] Ozyhar, T., Hering, S., Niemz, P. Moisture-dependent elastic and strength anisotropy of European beech wood in tension. *Journal of Materials Science*, 47(16), 6141–6150, 2012. doi :10.1007/s10853-012-6534-8
- [14] Niemz, P., Clauss, S., Michel, F., Hänsch, D., Hänsel, A. Physical and mechanical properties of common ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Wood Research*, 59(4), 671–682, 2014.
- [15] Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. *Holzforschung*, 70(8), 773–781, 2016. doi :10.1515/hf-2015-0229

- [16] Gambarelli, S., Bošnjak, J., Fararoni Platas, R. N., Jin, K. Experimental Study on Mechanical Properties of European Oak and Norway Spruce Clear Wood. *Materials*, 18(14), 3257, 2025. doi :10.3390/ma18143257