

# Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement hygro-mécanique microscopique du bois

**Chady El Hachem**

LMT-Cachan/ENS-Cachan/CNRS/Université Paris Saclay, 61, Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France ; elhachem@lmt.ens-cachan.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ. Etant un matériau hygroscopique, le bois subit des variations dimensionnelles d'un état hygrique à l'autre. A l'échelle microscopique, ceci est régi par des déformations au niveau des parois cellulaires. L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement hygro-mécanique de la structure 3D réelle du bois d'épicéa. Pour ce faire, des échantillons de taille représentative ont été conditionnés à différentes humidités relatives tout au long du cycle de sorption. Ils ont été scannés en micro-tomographie aux rayons X et les volumes correspondants sont post-traités. Les champs de déplacements entre un état sec et un état humide bien défini ont été calculés par corrélation volumique. Finalement, un modèle hygro-mécanique a été développé. Les champs de déplacement ont servi comme conditions aux limites mécaniques, et pour la validation du modèle. Toute une démarche numérique a été mise en place afin d'identifier les paramètres caractéristiques du matériau et valider le modèle développé. Les résultats montrent une bonne convergence du modèle et une estimation du coefficient de Poisson et du coefficient de gonflement des parois cellulaires.*

*ABSTRACT. Being a hygroscopic material, wood is subjected to various dimensional variations from a hygric state to another. At the microscopic scale, this is governed by deformations at the cell walls' level. The purpose of this study is modeling the hygro-mechanical behaviour of the real 3D structure of spruce wood. Specimens with representative dimensions have been conditioned at various relative humidity conditions along the sorption cycle. They have been scanned using X-ray micro-tomography and the corresponding volumes were post processed. The displacement fields between dried conditions and a humid state have been calculated by digital volume correlation. Finally, a hygro-mechanical model has been developed. The displacement fields have served as mechanical boundary conditions and for the model validation. A numerical approach has been adapted in order to identify the characteristic parameters of the material and validate the used model. The results show good convergence of the model, and an estimation of the Poisson coefficient and swelling coefficient of the cell walls.*

*MOTS-CLÉS : bois d'épicéa, modélisation microscopique, couplage hygro-mécanique, corrélation volumique, identification de paramètres, micro-tomographie aux rayons X.*

*KEY WORDS: spruce wood, microscopic modelling, hygro-mechanical coupling, volume correlation, parameters' identification, X-ray micro-tomography.*

---

L'utilisation du bois dans le domaine de la construction est de plus en plus répandue, notamment pour ses performances énergétiques et son isolation thermique. Etant un bois massif, le bois d'épicéa, qui fait l'objet de cette étude, est aussi connu pour ses propriétés mécaniques. En effet, ce matériau présente un aspect multi-échelle et anisotrope. A l'échelle macroscopique, on peut visuellement discerner les différents cycles de reproduction du bois, ainsi que les différentes directions : longitudinale, radiale et tangentielle. A l'échelle microscopique, le bois d'épicéa, ainsi que tous les bois résineux comportent des fibres (les trachéides et les parenchymes), formées de parois cellulaires, à l'intérieur desquelles il y a des cavités, appelées les lumens.

Etant un matériau hygroscopique, il est très sensible aux variations d'humidité relative. Ceci peut engendrer des variations dimensionnelles (gonflement ou retrait) et des dégâts, qui dans certains cas mènent à sa dégradation et sa détérioration. Il est donc essentiel d'évaluer son comportement vis-à-vis de sollicitations hygriques [RAF 13]. A l'échelle microscopique, les déformations locales sont dues à l'absorption de l'eau liée par les parois cellulaires. On distingue aussi l'eau libre qui se localise dans la porosité et n'interagit donc pas avec la matrice solide. Lors du cycle de sorption, le matériau absorbe en premier lieu l'eau liée jusqu'à saturation des parois cellulaires. Le Point de Saturation des Fibres (PSF) correspond à la teneur en eau pour laquelle les parois cellulaires sont complètement saturées en eau liée [EIT 11]. Au-delà du PSF, le matériau ne gonfle plus, puisqu'il n'absorbe que de l'eau libre. Il est donc évident que les variations dimensionnelles macroscopiques sont fortement dépendantes de phénomènes physiques locaux.

En effet, le comportement hygrique et mécanique du bois à l'échelle macroscopique a été intensivement étudié [ABA 15] [KRA 13]. Récemment, quelques études hygrique et mécanique ont été menées à l'échelle microscopique afin de mieux comprendre les interactions à petites échelles, et par la suite avoir une meilleure compréhension du comportement global du matériau. On en note quelques-unes [ALM 14] [GUO 15]. Cependant, une étude raffinée du couplage hygro-mécanique à l'échelle des fibres n'a pas été encore développée dans la littérature.

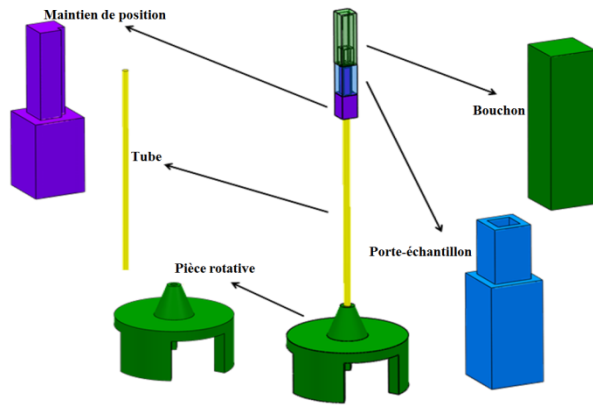
Dans ce travail, une campagne expérimentale est premièrement menée. Elle consiste à faire des suivis de scans de micro-tomographie aux rayons X de plusieurs échantillons conditionnés à différentes humidités relatives. Ensuite, les volumes scannés ont été post-traités, et des suivis morphologiques ont été faits tout au long du cycle de sorption. Les déplacements des volumes reconstruits d'un état sec à une humidité relative de 72% sont calculés à travers la corrélation volumique. Finalement, un modèle microscopique hygro-mécanique sur la structure réelle 3D du matériau est proposé. Une validation de ce modèle représentatif des déformations locales des parois cellulaires, par une approche d'identification de leurs différentes propriétés est faite, afin de minimiser les écarts entre le modèle numérique et les résultats de corrélation.

## 2. Démarche globale

L'intérêt scientifique de ce travail réside dans une meilleure compréhension du comportement hygro-mécanique du bois d'épicéa tout au long du cycle de sorption. En effet, afin de comprendre les phénomènes à l'échelle macroscopique, une caractérisation microscopique à l'échelle des parois cellulaires doit avoir lieu. Cette caractérisation locale va être suivie par un développement de modèle hygro-mécanique avec lequel les paramètres mécaniques du matériau seront calculés, afin de minimiser les écarts entre les résultats numériques et expérimentaux.

Pour ce faire, différents échantillons d'épicéa de taille  $3 \times 3 \times 20 \text{ mm}^3$  ont été étudiés. Chaque échantillon a été conditionné à plusieurs paliers d'humidité relative tout le long du cycle de sorption à température constante. A chaque fois qu'un échantillon atteignait l'équilibre en masse, il était scanné en micro-tomographie aux rayons X. Il s'agit d'une méthode non-destructive, qui génère une vue 3D de l'échantillon scanné [MAY 10]. La résolution des scans est fonction de la nature de l'échantillon testé, ainsi que de ses dimensions. Le micro-tomographe aux rayons X utilisé dans cette étude est le X50 au LMT. Afin de conserver la teneur en eau de chaque échantillon lors du scan, et afin de maintenir sa position d'un scan à l'autre, un montage spécifique a été élaboré (figure 1). Après les scans, l'invariabilité de la teneur en eau des échantillons a été vérifiée par pesée. Ces conditions expérimentales permettent de quantifier le gonflement et de mieux observer les variations morphologiques des parois cellulaires en passant d'un état hydrique à l'autre. En plus, afin de garantir que la zone étudiée n'a pas du tout subi des transferts d'humidité lors des scans, elle a été choisie de taille de  $1,34 \times 1,34 \times 1,34 \text{ mm}^3$ , et correspond au cœur de l'échantillon. La résolution obtenue est de  $3,35 \text{ } \mu\text{m}/\text{pixel}$ . La reconstruction 3D est faite à l'aide du logiciel efX. Un volume reconstruit est représenté dans la figure 2. Le post-traitement des résultats a été achevé à travers le logiciel iMorph [BRU 09]. Le seuillage de l'histogramme en niveau de gris des volumes

reconstruits a été également défini en AMPHUS. Le seuil de gris entre les phases solide (matrice) et la porosité a été défini comme le point ayant le minimum de niveau de gris entre ces phases. A chaque palier d'humidité relative, les granulométries des phases solide et poreuse ont été calculées. A partir de ces résultats, les évolutions des diamètres des pores et des épaisseurs des parois cellulaires peuvent être déduites.



**Figure 1.** Dispositif de conditionnement



**Figure 2.** Volume scanné en micro-tomographie aux rayons X (400x400x400 pix<sup>3</sup>)

Ensuite, deux paliers d'humidité relative sont choisis pour être étudiés dans la partie numérique. Ils correspondent à un état sec et à un état de 72% d'humidité relative. Avec ces paliers, la teneur en eau est certainement en dessous du PSF, ce qui justifie notre choix. De cette manière, il n'y aura pas encore de l'eau libre dans la porosité. Par la suite, ces deux volumes seront post-traités dans un logiciel de corrélation volumique. La démarche numérique, qui englobe en même temps la partie de corrélation volumique et la modélisation est décrite dans la figure 3.

La mesure de champs cinématiques volumiques consiste à calculer les champs de déplacements entre un volume dit référent et un autre déformé. La corrélation 3D, en se basant sur une discrétisation éléments finis, donne les déplacements des nœuds dus à une sollicitation hygrique d'un état sec à 72% d'humidité relative. Le logiciel utilisé est C8R [BOU 14]. En premier lieu, les erreurs dues à la micro-tomographie et au logiciel de corrélation volumique sont quantifiées. Pour faire cela, les déplacements résiduels d'un échantillon scanné deux fois avec les mêmes paramètres de scans et les mêmes conditions environnementales sont calculés. Par la suite, des volumes de 160x160x160 pix<sup>3</sup> sont sélectionnés, avec des éléments de taille 8x8x8 pix<sup>3</sup>. Concernant la partie numérique, l'objectif est de modéliser localement le comportement hygro-mécanique du matériau. En effet, l'originalité de cette démarche consiste à implémenter des volumes réels dans le modèle éléments finis et à valider ce dernier en prenant comme référence les résultats de corrélation. Les parois cellulaires (matrice solide) et les lumens (porosité) sont donc discernés et maillés dans Cast3m par des éléments cubiques de taille 1x1x1 pix<sup>3</sup> [BER 04]. Pour cela, les déplacements de corrélation ont été interpolés, afin de passer d'éléments d'arrête 8 pixels à des éléments d'arrête 1 pixel. En plus, dans la corrélation, il y a moins de précision sur les éléments aux bords des volumes traités. Le volume extrait pour la partie numérique est donc de dimensions 96x96x96 pix<sup>3</sup>, afin d'éviter d'avoir des éléments de bord [RET 08]. Néanmoins, les conditions aux limites mécaniques nécessitent aussi une attention particulière. En effet, ces conditions utilisées en numérique jouent un rôle primordial dans cette validation du modèle, qui est du même ordre du choix du modèle et des paramètres utilisés. De ce fait, les déplacements dus aux sollicitations hygriques, calculés en corrélation volumique seront implémentés dans le modèle en tant que conditions aux limites sur les faces extérieures du volume étudié. Par la suite, il n'y a que les déplacements des nœuds qui appartiennent à la matrice solide qui seront pris en compte (et non pas la porosité), que ce soit pour l'application des conditions aux limites, ou pour la validation du modèle numérique. Une fois la matrice solide identifiée, un travail spécifique a été fait afin de projeter les déplacements correspondants dessus.

Par ailleurs, un modèle hygro-mécanique isotrope local sera utilisé pour la modélisation. Toute la partie numérique est faite dans Cast3m. En effet, l'objectif est de faire un choix des paramètres à identifier afin que le modèle numérique converge vers les résultats expérimentaux. Comme expérimentalement deux paliers ont été testés, et les scans ont été faits à l'équilibre de masse, la cinétique des transferts hygriques n'a aucune influence sur les critères de convergence. De ce fait, la sensibilité des paramètres mécanique va être premièrement calculée, afin d'identifier ceux qui ont le plus d'influence sur les résultats.

A l'échelle microscopique, et tant que le matériau n'a pas encore atteint le PSF, il y a deux phases à prendre en compte : la porosité et la matrice solide (puisque'il n'y a pas d'eau libre). De ce fait, il faut attribuer des

propriétés locales à chaque des phases. En allant d'un jeu de paramètres initial, 45 (15 cm) commencer par un calcul de sensibilité des paramètres mécaniques : le module d'Young, le coefficient de Poisson et le coefficient de gonflement. Ensuite, les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats numériques seront choisis afin de les identifier.

Pour la partie hygrique, la diffusion de Fick, régit par l'équation [1] sera utilisée.

$$J = D \Delta w \quad [1]$$

où  $J$  est le flux massique,  $D$  la diffusion massique et  $w$  la teneur en eau. Pour la partie hygrique, on donnera un coefficient de diffusion à chaque phase, avec un rapport  $\frac{D_{matrice\ solide}}{D_{porosité}}$  de 0,004. Ce rapport correspond à une teneur en eau du matériau de 12% [SIA 84].

Et pour la partie mécanique, un modèle isotrope élastique [2] sera utilisé.

$$\sigma = \varepsilon_{m\acute{e}canique} E \quad [2]$$

où  $\sigma$  est la contrainte mécanique,  $\varepsilon_{m\acute{e}canique}$  la déformation mécanique et  $E$  le module d'Young. Le module d'Young ne sera attribué qu'à la matrice solide. Pour le premier jeu de paramètres, on prendra une valeur de 35 GPa. Une valeur de 0,3 sera désignée pour le coefficient de Poisson  $\nu$ .

La déformation totale est la somme des déformations mécanique et hygrique [3].

$$\varepsilon_{totale} = \varepsilon_{m\acute{e}canique} + \varepsilon_{hygrique} \quad [3]$$

La déformation hygrique est régit par l'équation suivante [4] :

$$\varepsilon_{hygrique} = \beta \Delta w \quad [4]$$

où  $\beta$  est le coefficient de gonflement. Le coefficient de gonflement est de même attribué à la matrice solide seulement, et on lui attribuera une valeur de 0,4 pour le premier jeu de paramètres.

Concernant les conditions aux limites hygriques, l'état initial du matériau est de 0% de teneur en eau, et un flux de 11% de teneur en eau est appliqué sur toutes les faces du volume étudié. Cette teneur en eau correspond à 72% d'humidité relative. Pour les conditions aux limites mécaniques, les déplacements de corrélation sont de même appliqués sur toutes les faces de l'échantillon. De cette manière, les conditions aux limites sont identiques aux conditions expérimentales, et les écarts entre les déplacements numériques et la corrélation sont dus au choix du modèle.

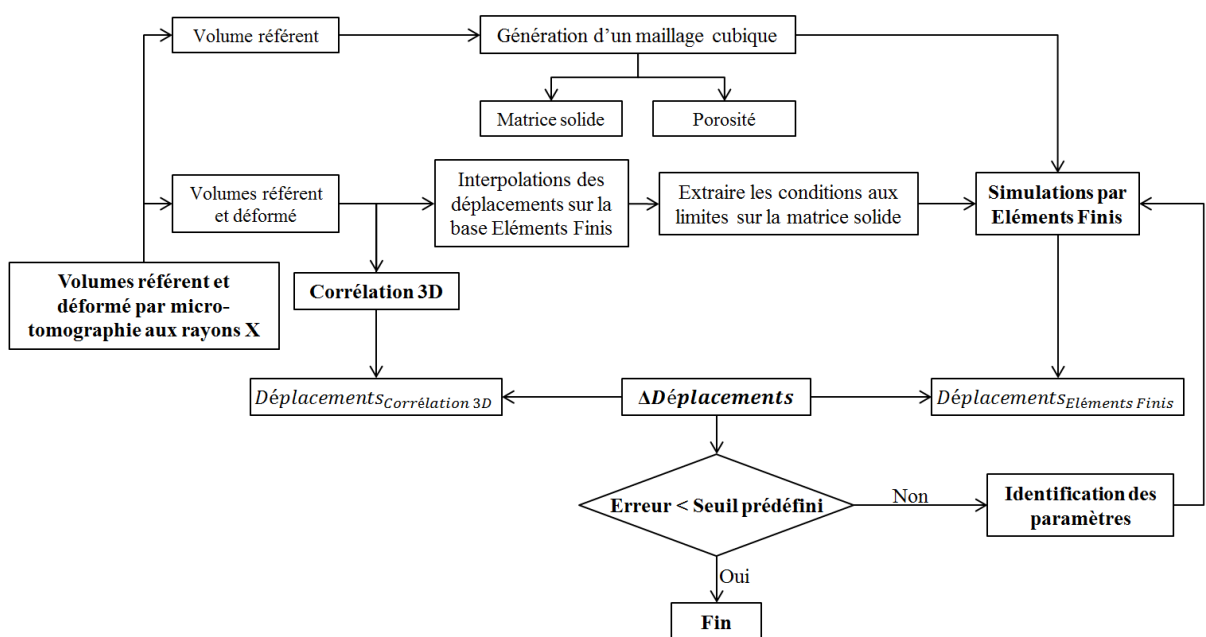


Figure 3. Démarche numérique

Ainsi, l'algorithme de Levenberg-Marquardt sera adopté pour la minimisation [MAR16], dont l'équation à résoudre est la suivante [5] :

$$\Delta p^k = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T R^k \quad [5]$$

où  $\Delta p$  est la variation des paramètres à identifier,  $J$  la matrice jacobienne,  $R$  les résidus de déplacements dont la norme est à minimiser,  $k$  le numéro de l'itération, et  $\lambda$  le terme d'amortissement de Levenberg-Marquardt.

Dans l'algorithme de minimisation, à chaque itération trois critères sont calculés, qui sont la moyenne par nœud des résidus de déplacements entre l'expérimental et le numérique, dans chacune des trois directions. Le critère de convergence sera la norme de ces trois critères. A partir d'un jeu de paramètres initial, l'erreur du modèle est déterminée à chaque fois. Pour que le calcul converge, il faut que l'erreur tende vers un seuil prédéfini. Ceci correspond à l'incertitude du logiciel de corrélation et des scans de tomographie calculée précédemment. Si l'erreur est supérieure au seuil, il faut refaire une identification des paramètres afin de chercher la convergence numérique. Par contre, si l'erreur tend vers le seuil prédéfini, l'identification est considérée réussie et le modèle numérique a bien convergé.

### 3. Caractérisation hygomorphique par micro-tomographie aux rayons X

Cette partie traite l'étude expérimentale et le post-traitement effectués. En effet, le but est de suivre les variations dimensionnelles locales des parois cellulaires lors de la prise d'humidité. Pour cela, les granulométries de la porosité et des parois cellulaires d'un échantillon sont représentées dans les figures 4 et 5.

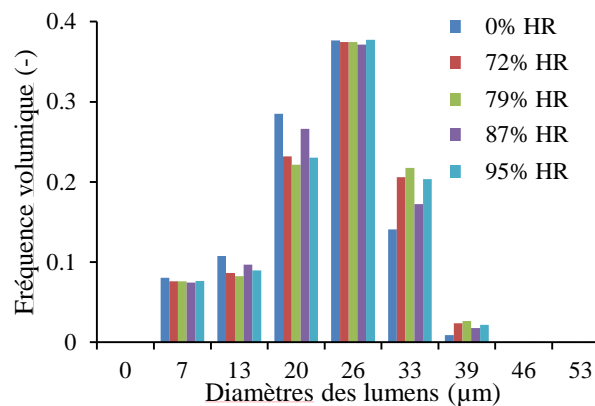


Figure 4. Evolution des diamètres des pores

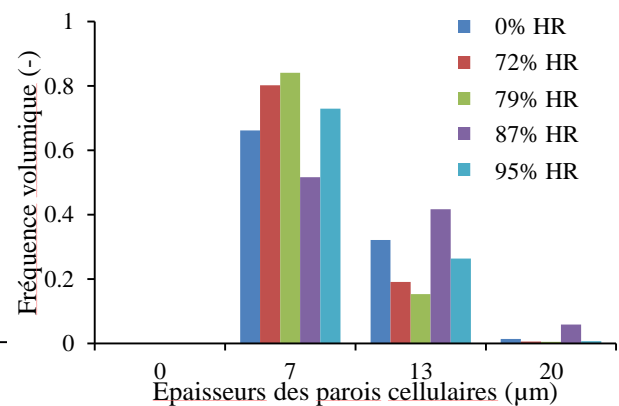


Figure 5. Evolution des épaisseurs des parois cellulaires

Les résultats montrent une dépendance claire des évolutions des épaisseurs des parois cellulaires et des diamètres des pores vis-à-vis des sollicitations hydriques. En effet, que ce soit pour la phase solide ou la phase poreuse, c'est évident qu'avant et qu'après 79% d'humidité relative les tendances ne sont pas les mêmes.

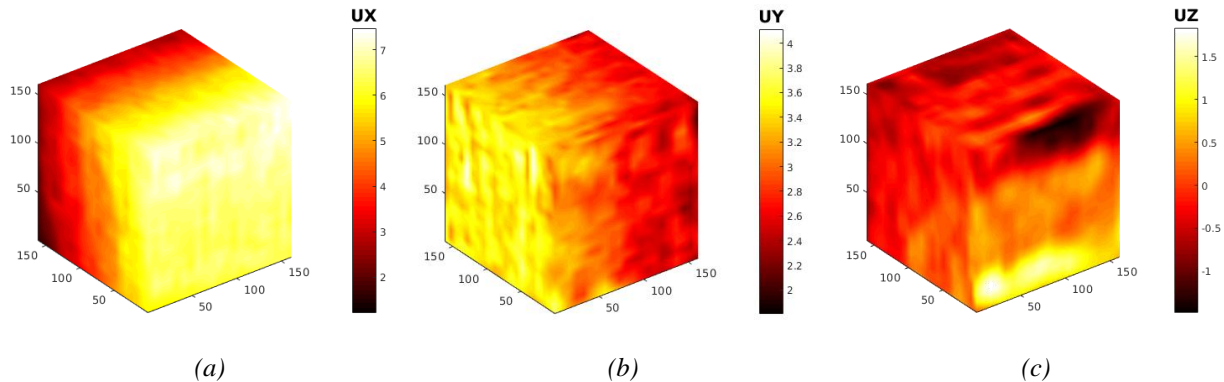
En allant de l'état sec (0% d'humidité relative) à une humidité relative de 79%, la figure 4 montre que la fréquence volumique des pores à grands diamètres augmente, et que celle des pores à petits diamètres diminue. Pour les mêmes paliers, la figure 5 montre que la fréquence volumique des parois cellulaires à petites épaisseurs augmente, et que celle des parois cellulaires à grandes épaisseurs diminue. Ces résultats indiquent que lorsque les parois cellulaires absorbent l'eau liée et gonflent, ceci va causer une augmentation des diamètres des pores, ainsi qu'une diminution de l'épaisseur des parois cellulaires.

Concernant les paliers supérieurs à 79% d'humidité relative, il n'y a pas de tendance claire des évolutions de la porosité et des parois cellulaires. Ceci est dû à la présence de l'eau libre dans le matériau. En effet, l'eau libre influence la qualité des résultats de tomographie. En plus, sa masse volumique, étant proche de celle des parois cellulaires, il est difficile de la discerner sur l'histogramme en niveaux de gris des volumes scannés. Cette hypothèse a été vérifiée en réalisant des tests de spectroscopie RMN. En plus, des essais de DRX ont été achevés afin de vérifier les différentes interactions entre les composants chimiques et l'humidité à différentes humidités relatives. Par contre, ces parties ne sont pas présentées dans ce travail.

Les volumes à l'état sec et à 72% d'humidité relative serviront pour la partie suivante, afin de quantifier les déplacements des parois cellulaires d'un état hygrique à l'autre.

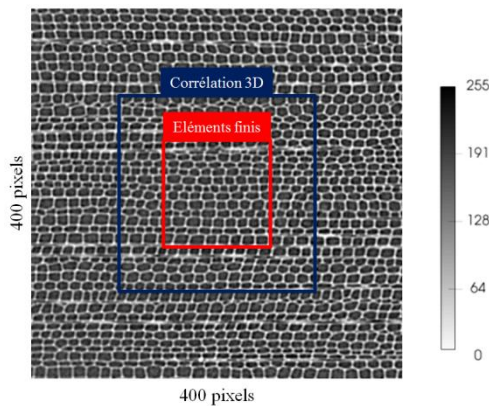
#### 4. Détermination des champs de déplacement sur la matrice solide

Dans cette partie, les champs de déplacements entre l'état sec et l'humidité relative de 72% sont étudiés et analysés. Ensuite, les traitements nécessaires sont faits afin de les implémenter dans Cast3m, et les projeter sur la matrice solide. Les résultats de corrélation entre les deux états hygriques sont représentés dans la figure 5.

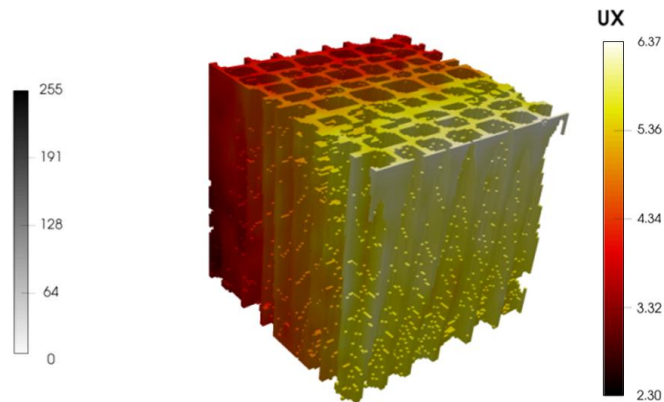


**Figure 6.** Champs de déplacement par corrélation volumique dans les trois directions : tangentielle (a), radiale (b), longitudinale (c)

Cette figure montre qu'il y a le plus de gonflement dans la direction tangentielle, un peu moins dans la direction radiale, et le moins de gonflement dans la direction longitudinale. Ces résultats sont conformes à ceux de [RAF 12], et mettent en relief l'anisotropie du bois, même à petite échelle.



**Figure 7.** Volume initial, volume de corrélation d'images et volume pour la modélisation



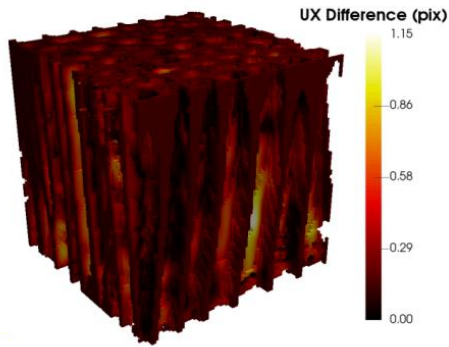
**Figure 8.** Champ de déplacements tangential projeté sur la matrice solide

Comme mentionné précédemment, la corrélation a été faite sur des volumes de 164 pixels par facettes. Pour la partie numérique, le volume étudié est de 96 pixels par facette. Il a été choisi comme le montre la figure 7, afin d'éviter les effets de bord de la corrélation [RET 08]. Les parois cellulaires et la porosité sont implémentées et maillées sous Cast3m. Les champs de déplacements sont donc projetés sur la matrice solide. Le champ de déplacements tangential est représenté dans la figure 8.

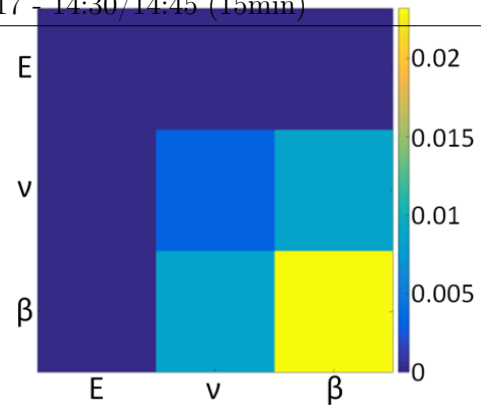
Ainsi, les déplacements issus de la corrélation volumique d'un échantillon de bois d'épicéa d'un état sec à un état de 72% d'humidité relative ont été calculés. De même, la matrice solide (parois cellulaires) et la porosité (lumens) ont été définies, implémentées sous Cast3m et maillées. Les déplacements projetés sur la matrice solide ont été identifiés. Ces champs de déplacements serviront pour la modélisation hygro-mécanique, que ce soit pour l'implémentation de conditions aux limites mécaniques, ou pour la validation du modèle utilisé.

#### 5. Modélisation hygro-mécanique sur la structure volumique réelle

Cette partie est consacrée à la modélisation du comportement hygro-mécanique du bois d'épicéa. Le but est de développer un modèle avec lequel on minimise l'erreur entre les déplacements issus de la corrélation et les déplacements calculés dans la partie numérique. Les résidus des déplacements tangentiels numériques et de corrélation sont représentés dans la figure 9, pour un jeu de paramètres donné. Les paramètres à identifier sont choisis à partir du calcul de sensibilité représenté dans la figure 10.



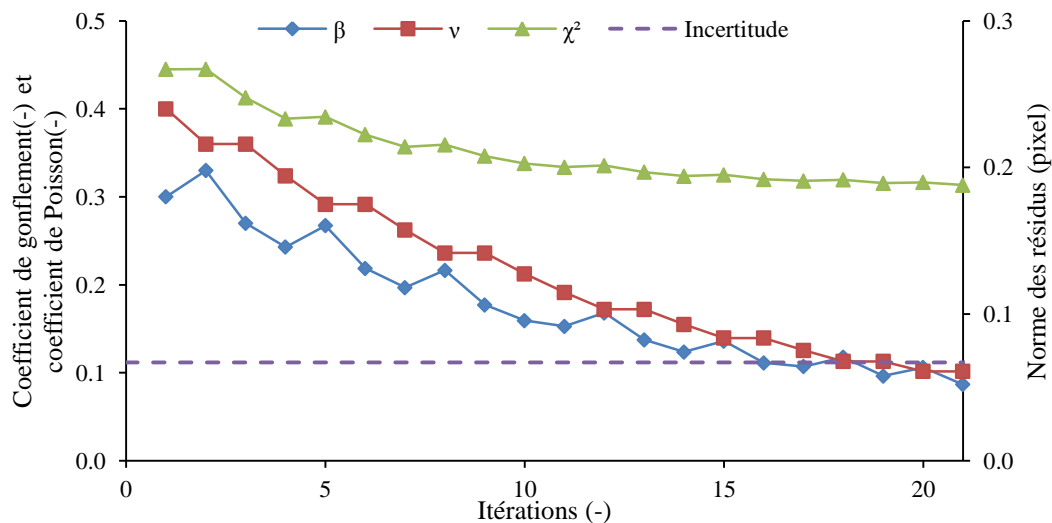
**Figure 9.** Résidus des déplacements numériques et de corrélation dans la direction tangentielle



**Figure 10.** Matrice de sensibilité des paramètres mécaniques

Evidemment, le modèle numérique est plus sensible au coefficient de gonflement  $\beta$ , un peu moins au coefficient de Poisson  $\nu$ , et pas sensible du tout au module d'Young  $E$ . Le coefficient de gonflement et le coefficient de Poisson seront donc les paramètres à identifier.

La figure 11 montre la minimisation de l'erreur entre l'expérimentation et le numérique, ainsi que l'identification du coefficient de Poisson et du coefficient de gonflement. Lors de l'évolution de ces paramètres, l'erreur, qui est la norme des résidus, a diminué de 0,27 à 0,19 pixels. Les valeurs du coefficient de Poisson et du coefficient de gonflement varient dans ce cas de 0,3 et 0,4 à presque 0,09 et 0,1 respectivement.



**Figure 11.** Evolutions des paramètres à identifier et minimisation du critère de convergence

Ces résultats montrent une bonne convergence de la norme des résidus, et une estimation physique des paramètres identifiés. Néanmoins, des modifications peuvent être rapportées au modèle utilisé afin de représenter au mieux la structure complexe du bois. Par exemple, en implémentant un comportement mécanique anisotrope, ou aussi des paramètres matériaux qui évoluent en fonction de la teneur en eau.

## 6. Conclusions et perspectives

Ce travail a permis d'abord de comprendre la microstructure du bois via des scans tomographiques. Ceux-ci ont permis par la suite d'intégrer le critère hygroscopique pour évaluer les changements morphologiques associés à ces évaluations. En effet, en dessous du PSF, lorsque l'humidité relative augmente, les diamètres des pores augmentent, et les épaisseurs des parois cellulaires diminuent.

Ensuite les champs de déplacements d'un échantillon sont calculés par corrélation volumique, d'un état sec à une humidité relative de 72%. D'autre part, la matrice solide et la porosité de l'échantillon ont été discernés et maillés. Ainsi, les champs de déplacements mesurés en corrélation ont été interpolés et projetés sur la matrice solide du matériau. Ceci a servi pour l'implémentation de conditions aux limites mécaniques dans la partie

numérique. Pour la modélisation de la diffusion de l'eau dans un bois non saturé (isotrope) élastique avec une déformation hygrique ont été utilisés. En plus les résultats de corrélation ont servi pour la validation du modèle hygro-mécanique utilisé, ainsi que pour l'identification des paramètres mécaniques. Les évolutions des paramètres du coefficient de Poisson et du coefficient de gonflement de manière à minimiser l'erreur du modèle ont été étudiées.

Toujours dans la complémentarité de ce travail, on cherche à mieux représenter la microstructure complexe du bois d'épicéa, en supposant un comportement anisotrope de la matrice solide. D'autre part, on cherche à travailler avec des teneurs en eau supérieures au PSF, et prendre en considération la présence de l'eau libre dans la porosité.

## 7. Bibliographie

- [ABA 15] ABAHRI K., BELARBI R., EL HACHEM C., « Caractérisation macro-hydriques des matériaux biosourcés », *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bayonne, 27-29 mai 2015.
- [ALM 14] ALMEIDA G., HUBER F., PERRÉ P., « Free shrinkage of wood determined at the cellular level using an environmental scanning electron microscope », *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 16, n° 2, 2014, p. 187-198.
- [BER 04] BERNARD-MICHEL G., LE POTIER C., BECCANTINI A., GOUNAND S., CHRAIBI M., « The andra couplex 1 test case: comparisons between finite-element, mixed hybrid finite element and finite volume element discretizations », *Computational Geosciences*, vol. 8, n° 2, 2004, p. 187-201.
- [BOU 14] BOUTERF A., ROUX S., HILD F., ADRIEN J., MAIRE E., MEILLE S., « Digital volume correlation applied to X-ray tomography images from spherical indentation tests on lightweight gypsum », *Strain*, vol. 50, n° 5, 2014, p. 444-453.
- [BRU 09] BRUN E., VICENTE J., TOPIN F., OCCELLI R., CLIFTON M.J., « Microstructure and transport properties of cellular materials: representative volume element », *Advanced Engineering Materials*, vol. 11, n° 10, 2009, p. 805-810.
- [EIT 11] EITELBERGER J., HOFSTETTER K., « A comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation », *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, n° 10, 2011, p. 1861-1866.
- [GUO 15] GUO J., SONG K., SALMÉN L., YIN Y., « Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment », *Carbohydrate Polymers*, vol. 115, 2015, p. 207-214.
- [KRA 13] KRAUSE C., DÉRY BOUCHARD C.A., PLOURDE P.Y., MAILLY D., « Compression wood and stem horizontal displacement in black spruce and Jack pine plantations in the boreal forest », *Forest Ecology and Management*, vol. 302, 2013, p. 154-162.
- [MAR 63] MARQUARDT D., « An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters », *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, n° 2, 1963, p. 431-441.
- [MAY 10] MAYO S.C., CHEN F., EVANS R., « Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography », *Journal of Structural Biology*, vol. 171, n° 2, 2010, p. 182-188.
- [RAF 12] RAFSANJANI A., DEROME D., CARMELIET J., « The role of geometrical disorder on swelling anisotropy of cellular solids », *Mechanics of Materials*, vol. 55, 2012, p. 49-59.
- [RAF 13] RAFSANJANI A., LANVERMANN C., NIEMZ P., CARMELIET J., DEROME D., « Multiscale analysis of free swelling of Norway spruce », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 54, 2013, p. 70-78.
- [RET 08] RÉTHORÉ J., BESNARD G., VIVIER G., HILD F., ROUX S., « Experimental investigation of localized phenomena using digital image correlation », *Philosophical Magazine*, vol. 88, n° 28-29, 2008, p. 3339-3355.
- [SIA 84] SIAU J.F., *Transport processes in wood*, New York, Springer, 1984.