



**HAL**  
open science

**Etude de phénomènes multi-physiques couplés  
Application au bois sous les sollicitations  
thermo-hydro-mécaniques variables induites par  
l'opération de séchage**

Pierre Chassagne, Emmanuelle Vidal-Sallé, Jean-François Jullien

► **To cite this version:**

Pierre Chassagne, Emmanuelle Vidal-Sallé, Jean-François Jullien. Etude de phénomènes multi-physiques couplés Application au bois sous les sollicitations thermo-hydro-mécaniques variables induites par l'opération de séchage. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812980

**HAL Id: hal-01812980**

**<https://hal.science/hal-01812980>**

Submitted on 12 Jun 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

---

# Etude de phénomènes multi-physiques couplés

## Application au bois sous les sollicitations thermo-hydro-mécaniques variables induites par l'opération de séchage

Pierre Chassagne - Emmanuelle Vidal-Sallé - Jean François Jullien

\* Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides, INSA de Lyon  
Bât. J. Jacquard 69621 Villeurbanne Cedex

{[pierre.chassagne](mailto:pierre.chassagne@insa-lyon.fr), [jean-francois.jullien](mailto:jean-francois.jullien@insa-lyon.fr), [emmanuelle.vidal-salle](mailto:emmanuelle.vidal-salle@insa-lyon.fr)}@insa-lyon.fr

---

*RÉSUMÉ.* Aujourd'hui, le bois doit répondre, à l'issue de la première transformation, aux critères d'un matériau d'ingénierie. Cela nécessite l'élaboration d'un matériau à teneur en eau définie, avec un classement mécanique et une variabilité déterminée. Le séchage est une opération incontournable pour l'obtention de ces qualités, mais souvent mal maîtrisé, il entraîne, en fin de procédure, des distorsions sources de pertes importantes. L'accent est à mettre sur l'optimisation des process de séchage conduisant au minimum de distorsions au moyen d'outils de prédiction par éléments finis. Un outil numérique général thermo-hydro-mécanique 3D pour le bois a été développé à l'INSA de Lyon. Celui-ci permet de prendre en compte les effets de mécanosorption et les variations thermo-hydriques associées. Il est utilisé ici dans le but d'ouvrir les possibilités de prédiction des distorsions lors du séchage.

*ABSTRACT :* Today, the wood must fulfil, at the end of the first transformation, the engineering material criteria. It requires the elaboration of a material with a defined moisture content, a mechanical sorting and a determined variability. The wood drying is an operation that cannot be ignored to obtain these qualities, but often bad controlled, it leads, at the end of the procedure, to distortions sources of important losses. The stress has to be put on the drying processes optimization driving to the minimum of distortions, by means of finite element prediction tools. A general 3D thermo-hydro-mechanical tool for the wood has been developed at the INSA of Lyon. This one allows to take into account the mechanosorptive effects and the associated thermo-hydric variations. It is used with the aim of opening up the possibilities to predict the distortions during the drying operation.

*MOTS-CLÉS :* séchage, modélisation numérique, variations hydriques, orthotropie, distorsions, mécanosorption, hétérogénéités.

*KEYWORDS :* drying, numerical modelling, hydric variations, orthotropy, distortions, mechanosorption, heterogeneities.

---

## **1. Objectifs et démarche scientifiques globaux**

Les travaux de recherches se sont orientés vers la compréhension du comportement mécanique du bois lors du séchage, en vue d'une optimisation des process, associée au développement de lois mathématiques capables d'intégrer des mécanismes physiques et chimiques agissant au sein du matériau [PERR 99, RAN 95, SVE 99]. La complexité de ce moyen d'investigation réside d'une part dans la formulation de lois de comportement nécessitant une compréhension complète des phénomènes thermo-hydro-mécaniques couplés et découplés, et agissant à différentes échelles du matériau ; et d'autre part dans la prise en compte de paramètres d'hétérogénéité du matériau liés à la croissance de l'arbre (orthotropie cylindrique, mode de débit, orientation des fibres longitudinales, conicité de croissance...) [OMA 00, PER 01].

Pour pouvoir intégrer ces deux aspects et assurer le développement de procédures de séchage optimisées et validées il est nécessaire de se baser sur un modèle 3D, car selon le type d'hétérogénéité rencontrée, le matériau sera sollicité dans une ou toutes les directions d'orthotropie (L, R ou T). Un outil de modélisation, avec prise en compte des effets 3D, de la viscoélasticité non-linéaire et des conséquences mécaniques induites par les variations hydriques dans le domaine de la température ambiante (<35°C) a été développé à l'INSA pour analyser la durabilité de composants bois [BOU 03]. Cet outil a été validé à partir de campagnes d'essais sur le comportement différé dans la direction longitudinale de bois résineux (à hydrique constant et variable) [PIT 96]. Basées sur une approche phénoménologique, ces études ont permis de mettre en exergue les paramètres majeurs pilotant la réponse mécanique du matériau à des températures faibles, et ont permis d'entamer les travaux sur le séchage qui font l'objet de cet article.

La pertinence des calculs mécaniques est conditionnée par une bonne estimation des phénomènes de transfert de masse et de chaleur, générés aussi bien dans le milieu poreux bois qu'au niveau de ses surfaces d'échanges avec la masse d'air qui l'entoure. Le caractère couplé de ces transferts est fondamental dans ce type d'étude.

## **2. Lois de comportement, hétérogénéités et distorsions**

### **2.1. Lois de comportement à températures faibles**

En dépit des différences observées en terme de cinétique et d'amplitude des phénomènes de fluage dans les directions transversales et longitudinale, les similarités entre les mécanismes physico-chimiques observés permettent d'admettre que l'origine des effets mécanosorptifs peut être exprimée avec le modèle qualitatif développé à l'INSA de Lyon [BOU 03]. En d'autres termes, la rigidité et la stabilité de la paroi cellulaire du bois dans les directions R et T sont de la même manière affectées par les variations d'humidité aux niveaux micro- et ultra-structuraux. C'est pour cela que dès aujourd'hui, une campagne d'essais de caractérisation du fluage en R et T a été entamée à l'INSA et permettra d'alimenter plus finement les lois de comportement. Un modèle de Maxwell généralisé à 7 branches a été employé pour la représentation du comportement global. Les 7 branches constitutives sont

fonctions de 3 paramètres prépondérants sur la réponse mécanosorptive : l’histoire et le taux de variations d’humidité subies, ainsi que le niveau de contrainte généré. A des niveaux de températures plus élevés, ce dernier devra intervenir dans la définition des fonctions d’activation de fluage relatives à chaque branche de Maxwell, ainsi que dans les calculs de transferts de masse, considérés selon la seconde loi de Fick.

Associé à cela, un comportement fortement non-linéaire dans les directions R et T a été introduit. A la vue d’essais à court terme, réalisés avec des sollicitations dans les directions perpendiculaires aux fibres, une perte de rigidité du matériau est observée très rapidement, à des niveaux de contraintes faibles vis-à-vis de la limite de rupture [WID 04]. Une caractérisation de la réponse instantanée en R et T semble importante en vue d’assurer une représentation complète du comportement du bois soumis à des procédures de séchage parfois complexes. La vitesse et le type de transferts de masse résultants vont engendrer des états de contraintes élevés dont certaines valeurs peuvent osciller entre traction et compression. Il semble donc nécessaire de bien connaître le comportement du bois soumis à des phases associées de perte de rigidité instantanée et d’inversion de contraintes.

Dans un premier temps, les comportements en traction et compression sont considérés de manière assez simpliste et les non-linéarités en R et T traitées comme un problème de plasticité. Le seuil d’activation de “la plastification” est atteint pour une valeur égale au tiers de la contrainte de rupture, aussi bien en traction qu’en compression ; traction et compression pouvant avoir des limites de rupture différentes. Une “zone d’écrouissage” du matériau est obtenue au-delà du seuil ainsi défini, où la rigidité du bois devient 4 fois moins importante. Dans cette phase, l’hypothèse est faite que si les contraintes diminuent, leur décharge est effectuée élastiquement (avec la rigidité initiale) aussi bien en traction qu’en compression.

## ***2.2. Hétérogénéités et distorsions résultantes***

Lors d’une opération de séchage, quatre types de distorsions, dépendant d’hétérogénéités liées à la croissance de l’arbre, peuvent se manifester et altérer la géométrie de pièces de bois : le tuilage, le gauchissement, les flèches de face et de chant. Le développement d’une loi de comportement globale autorise l’intégration des facteurs d’influence fonctions de la géométrie de croissance de l’arbre. Leurs variations auront des impacts directs sur les paramètres mécaniques du matériau, mais aussi sur l’évolution des distorsions au travers des repères d’orthotropie cylindrique intégrés. Différents auteurs ont publié des résultats expérimentaux visant à établir une étude de sensibilité des paramètres majeurs liés à la croissance de l’arbre, développant ainsi des premières équations empiriques [OMA 00, PER 01].

Les paramètres du modèle relatifs au fluage ne dépendent pas directement des hétérogénéités de la pièce de bois étudiée, mais de manière indirecte. En effet, l’évolution dans le temps des phénomènes différés dépend des champs de contraintes / déformations, eux-mêmes fonctions des variations des caractéristiques mécaniques, ce qui est géré automatiquement par l’algorithme de résolution. Généralement, le mode de débit, soit la position  $r$  de la pièce considérée dans le

billon, ainsi que l'angle des fibres  $\theta$  du bois sont les deux paramètres d'hétérogénéité considérés dans les modèles, supposés très influents sur l'évolution des modules élastiques et des coefficients de retrait / gonflement, mais également directement sur la géométrie des pièces de bois étudiées (rayon des cernes, direction de l'axe d'orthotropie). Ainsi, [OMA 03], à partir d'études basées sur des essences d'Épicéa de Norvège et de Pin Radiata, définissent des équations d'influence sur les paramètres matériaux :  $E_i = f(r)$  ;  $G_{ij} = f(r, r^2)$  ;  $\beta_i = f(r, r^2)$  et  $\theta = f(r, r^2)$  ;  $E_i$ ,  $G_{ij}$ ,  $\beta_i$  sont respectivement le module d'élasticité dans la direction  $i$ , le module de cisaillement dans le plan  $ij$  et le coefficient de retrait / gonflement dans la direction  $i$ . De manière générale, la prise en compte globale dans les lois de comportement de ces deux hétérogénéités d'influence majeure justifie le recours à un modèle tridimensionnel, les trois directions d'orthotropie étant susceptibles d'être sollicitées.

### 3. Séchage à faibles températures : application à l'étude du tuilage

#### 3.1. Etude de sensibilité de différents paramètres

L'intérêt porté dans un premier temps sur l'étude du phénomène de tuilage résulte du fait que les directions sollicitées sont les directions R et T ; directions nécessitant un développement important des travaux jusque là réalisés à l'INSA (validés uniquement en L).

Dans ce cadre, les travaux se sont d'abord tournés vers une étude de sensibilité de différents paramètres influents sur la valeur des amplitudes de tuilage (définies à partir de la mesure du déplacement relevé au milieu de la section de bois). Les trois aspects étudiés ici montrent la nécessité de bien définir certaines caractéristiques. L'exemple d'une section de bois de 40cm×4cm est employé, et les conditions d'humidité de l'air imposées sont les suivantes : HR d'équilibre initial = 70% ; HR = 35% pendant 47 jours ; HR = 70% pendant 61 jours. Il est montré que la cinétique et l'amplitude des déformations d'une pièce de bois soumise à des variations d'humidité est fortement influencée par les paramètres suivants : mode de débit (position  $r$  dans le billon, Figure 1) ; coefficients de retrait / gonflement dans les directions R et T (étude de différents  $\beta_T/\beta_R$ ) ; type de transferts : symétrie ou dissymétrie des échanges (§3.2 autres conditions d'expérience, Figure 2). L'analyse de ces différents paramètres démontre l'importance d'effectuer leur caractérisation précise pour l'étude du phénomène de tuilage.

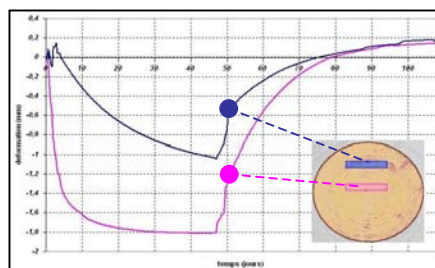
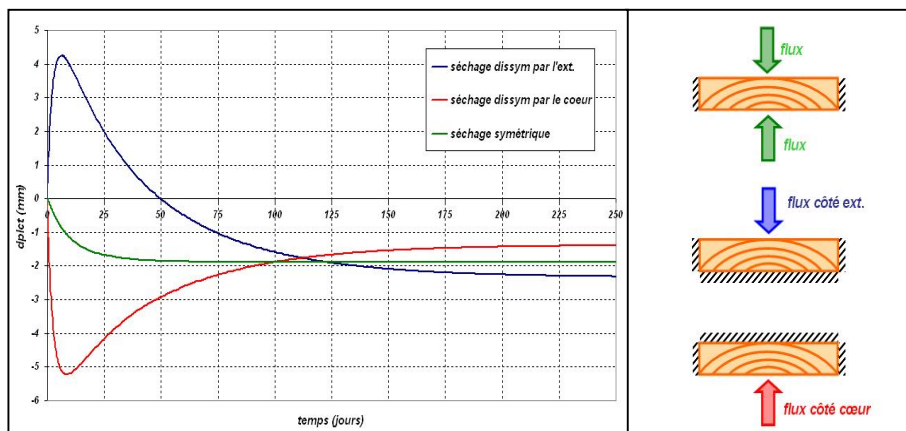


Figure 1. Influence du mode débit

### 3.2. Importance du caractère visco-élastique non-linéaire

Une bonne définition des lois de comportement utilisées permet un accès à l'évolution des champs de contraintes / déformations générés par les gradients hydriques induit par la procédure de séchage. L'application réalisée consiste à étudier l'évolution d'une section de planche, de géométrie définie ( $S=40\text{cm}\times 4\text{cm}$ ) et d'humidité interne équilibrée dans une ambiance à 95% d'humidité relative ( $w_{\text{bois}} = 25\%$ ), que l'on place subitement dans une atmosphère plus sèche ( $\text{HR} = 65\%$  soit  $w_{\text{bois}} = 12\%$ ). Le paramètre variant dans cette application est le type d'échange appliqué à la surface de l'échantillon : création d'une dissymétrie par isolation d'une des faces avec l'extérieur. A partir de cet exemple de séchage simple, à température faible, il est montré que la prise en compte des déformations mécanosorptives et "plastiques" va influencer la géométrie obtenue en fin de procédure (Figure 2).

En effet, selon le type de transfert de masse appliqué, les gradients hydriques générés au sein du matériau sont plus ou moins importants. L'état de contrainte ainsi engendré va favoriser ou non le développement de déformations irréversibles. La vitesse et l'importance des variations d'humidité interne influencent de manière significative l'amplitude finale du tuilage. La maîtrise du comportement visco-élastique non-linéaire du bois dans les directions R et T pourra autoriser la définition de procédures de séchage, avec trajet optimisé (définition des variations thermo-hydriques), permettant l'accès à des géométries finales présentant un minimum de distorsions.



différentes hétérogénéités du bois de manière indépendante ou couplée. Les premiers travaux de modélisation présentés dans cet article, relatifs à la sensibilité de paramètres liés à la croissance de l'arbre, montre l'importance de la caractérisation du poids de chacun dans la réponse du matériau soumis à diverses sollicitations thermo-hydriques.

A cela, s'ajoute une nécessité de bien définir le caractère viscoélastique non-linéaire du bois dans les trois directions d'orthotropie pour peser son importance réelle dans la représentation des phénomènes. Lorsqu'on intègre dans les modèles des effets mécanosorptifs associés à des déformations irréversibles et des pertes de rigidité liées à "la plasticité", les courbes de prédiction calculées montrent l'apparition d'états géométriques finaux directement dépendant de l'importance des gradients hydriques générés lors de la phase de séchage. Les travaux présentés ici permettent d'ouvrir des perspectives autorisant une meilleure compréhension du comportement du bois, et ouvrent la possibilité de déterminer des tables de séchage réduisant les distorsions finales du bois, avec des temps optimisés. Pour cela, il est nécessaire d'intégrer au plus vite dans les lois de comportement les effets d'une température.

#### 4. Bibliographie

- [BOU 03] E. BOU-SAÏD. *Contribution à la modélisation des effets différés du bois et du béton sous conditions climatiques variables. Application aux structures mixtes bois-béton*. PhD Thesis, INSA Lyon, France, 2003
- [OMA 00] S. OMARSSON, O. DAHLBLOM, H. PETERSSON. *A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 3 : Influence of annual ring orientation*. Wood Sc. & Tech. 34 : 207-219, 2000
- [OMA 03] S. OMARSSON, D. COWN, O. DAHLBLOM. *Finite Element simulations of moisture distortion in Laminated Timber Products of Norway Spruce and Radiata Pine*. 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference, 2003
- [PERR 99] P. PERRÉ, I. W. TURNER. *A 3-D version of TransPore : a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*. Int. Journal of Heat & Mass Transfer 42 : 4501-4521, 1999
- [PER 01] M. PERSTORPER, M. JOHANSSON, R. KLIGER, G. JOHANSSON. *Distortion of Norway spruce timber. Part 1 : Variation of relevant wood properties*. Holz als Roh- und Werkstoff 59 : 94-103, 2001
- [PIT 96] V. PITTET. *Etude expérimentales des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à des variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée*. PhD Thesis, EPFL, Suisse, 1996
- [RAN 95] A. RANTA-MAUNUS, H. FORSEN, A. HANHIJÄRVI, A. HUKKA, J. PARTANEN. *Simulation of sawn timber drying*. Technical Research Center of Finland, 1995
- [SVE 99] S. SVENSSON, A. MÅRTENSSON. *Simulation of drying stresses in wood. Part 1 : Comparison between one- and two-dimensional models*. Holz als Roh- und Werkstoff 57 : 129-136, 1999
- [WID 04] S. WIDEHAMMAR. *Stress-strain relationships for Spruce wood : influence of strain rate, moisture content and loading direction*. Experimental Mechanics 44 : 44-48, 2004