



**HAL**  
open science

## Actes des 4èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

Eric Fournely, Sabine Caré, Joseph Gril

### ► To cite this version:

Eric Fournely, Sabine Caré, Joseph Gril. Actes des 4èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois. 4èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois , Nov 2015, Clermont-Ferrand, France. 4, , 2015, Journées Annuelles du GDR 3544 Sciences du Bois. hal-01265093

**HAL Id: hal-01265093**

**<https://enpc.hal.science/hal-01265093>**

Submitted on 25 Mar 2016

**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.



GDR 3544  
Sciences du Bois



## Actes des 4<sup>èmes</sup> journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

*Thème : Le cycle de vie du Bois*

04-06 nov | Clermont-Ferrand Egletons Limoges



# 4<sup>èmes</sup> JOURNÉES SCIENTIFIQUES

*Campus des Cézeaux dans les locaux du pôle commun Polytech/Isima, Clermont-Ferrand.*

**04-06 Novembre 2015**

**Centre des Cézeaux, Clermont-Ferrand, France**

**Manifestation :** 4<sup>èmes</sup> journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, Clermont-Ferrand, Nov. 2015

**Collection :** Journées annuelles du GDR 3544 sciences du bois, Volume 4, 2015

**Coordination et édition des actes :** Eric FOURNELY (Institut Pascal Clermont-Ferrand), Sabine CARE (Navier Champs-sur-Marne), Joseph GRIL (LMGC Montpellier)



## SOMMAIRE

SOMMAIRE .....	3
EDITORIAL.....	4
SOUTIENS ET SPONSORS .....	6
COMITÉ D'ORGANISATION .....	7
COMITÉ SCIENTIFIQUE .....	8
PROGRAMME .....	9
GROUPE DE TRAVAIL.....	10
PRÉSENTATIONS ORALES INVITÉES .....	11
POSTERS.....	29
PARTICIPANTS.....	177

## EDITORIAL

Le **Groupement de Recherche en Sciences du bois** (GDR 3544 « Bois ») a été créé en 2012 par le CNRS. La mission du groupement est : (1) de structurer la recherche sur le bois en France pour lui donner une visibilité nationale, (2) de contribuer au développement de la formation en sciences du bois et (3) de servir de relai aux réseaux internationaux de sciences du bois. Afin de répondre à ces objectifs des journées scientifiques sont organisées qui doivent permettre de partager une culture commune, de promouvoir les travaux des laboratoires membres du GDR, d'échanger sur des enjeux transversaux (relations internationales, formation, partage des ressources). Les trois journées sont ouvertes à tous les chercheurs intéressés par les sciences du bois, français comme étrangers; l'objectif étant d'accueillir un maximum de participants des laboratoires partenaires du GDR et de favoriser la participation des jeunes chercheurs (doctorants ou post-doctorants). Dans l'esprit du GDR, nous souhaitons que tous les chercheurs assistent à l'ensemble des journées annuelles car l'objectif n'est surtout pas de cloisonner les thématiques mais bien au contraire de développer une culture commune en espérant stimuler l'interdisciplinarité et les transferts de savoir-faire et d'outils entre thématiques.

Les sessions des **quatrième**s journées annuelles du GDR 3544 ont été organisées autour du thème du « *cycle de vie du bois* » : sa formation dans l'arbre, ses valorisations à l'échelle de la molécule, du matériau et de la structure et ses transformations ultimes. Elles consistent comme les années précédentes en exposés invités, suivis de présentations "flash" appuyées par des posters dont certains ont été primés (prix des meilleurs posters, des posters les plus originaux, 'très spécial'). Une session spéciale "économie et retours d'expériences de projets innovants" a été également organisée dans un esprit d'ouverture vers les professionnels. Des créneaux pour des réunions de groupe de travail à l'initiative des participants ont été aussi aménagés, ainsi que la possibilité de découverte des activités des laboratoires hôtes de Clermont-Ferrand, Egletons et Limoges. Une soirée gala sur le thème du volcanisme a été organisée le deuxième jour.

Merci aux personnels de l'Institut Pascal, PIAF, ICCF, LCSN et GEMH qui se sont mobilisés nombreux pour accueillir cette manifestation et en garantir le succès.

Les actes de ces journées rassemblent les résumés des conférenciers invités (exposés) et ceux des contributions volontaires (posters).

Joseph GRIL

Directeur du GDR 3544 Sciences du bois

Site Web du GDR 3544 Sciences du bois : <http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/>



Laboratoires hôtes (lieu - contact)

Lieu : Campus des Cézeaux, locaux de Polytech/ISIMA, Clermont-Ferrand

Institut PASCAL, Clermont-Ferrand (*Eric Fournely*)

PIAF, Clermont-Ferrand (*Patricia Drevet*)

ICCF, Clermont-Ferrand (*Vincent Verney*)

LCSN, Limoges (*Guy Costa*)

GEMH, Egletons (*Frédéric Dubois*)

Illustration 1<sup>ère</sup> page

Réalisée par Guy Costa, Limoges

Remarque

Version pour les actes des journées annuelles 2015 déposés dans la collection HAL « sciences du bois » : <https://hal.archives-ouvertes.fr/BOIS/>.

Date d'édition : Mars 2016 – Auteur : Sabine Caré, Navier Champs-sur-Marne -

## SOUTIENS ET SPONSORS

L'ensemble des partenaires est remercié pour le soutien apporté à cette manifestation.



**COMITÉ D'ORGANISATION**

Coordinateur : Eric Fournely

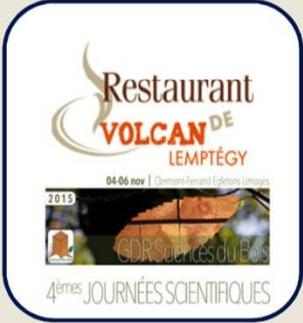
<b>Identité</b>	<b>Etablissement</b>
Nicolas Angelier	GEMH Egletons
Alexis Béakou	Institut Pascal UBP Clermont
Abdelhamid Bouchair	Institut Pascal UBP Clermont
Sabine Caré	Navier Champs sur Marne
Myriam Chaplain	I2M Bordeaux
Karine Charlet	Institut Pascal UBP Clermont
Françoise Cialdella	Institut Pascal UBP Clermont
Guy Costa	LCSN Limoges
Jean-François Destrebecq	Institut Pascal UBP Clermont
Jérôme Dopeux	GEMH Egletons
Patricia Drevet	UMR PIAF Clermont
Frédéric Dubois	GEMH Egletons
Eric Fournely	Institut Pascal UBP Clermont
Meriem Fournier	AgroParisTech Nancy
Norbert Frizot	UMR PIAF Clermont
Vincent Gloaguen	LCSN Limoges
Gaël Godi	UMR PIAF Clermont
Jacqueline Gorse	Institut Pascal UBP Clermont
Joseph Gril	LMGC Montpellier
Jean-Louis Jullien	UMR PIAF Clermont
Sabine Lhernould	LCSN Limoges
Rémy Marchal	BioWooEB Montpellier
Dominique Marcon	UMR PIAF Clermont
Corinne Martin	AgroParisTech Nancy
Sandrine Meyniel	UMR PIAF Clermont
Rostand Moutou-Pitti	Institut Pascal UBP Clermont
Octavian Pop	GEMH Egletons
Nicolas Sauvat	GEMH Egletons
Isabelle Théry-Parisot	Cepam Nice
Claire-Lyse Toupuy	GEMH Egletons
Évelyne Toussaint	Institut Pascal UBP Clermont
Vincent Verney	ICCF Clermont-Ferrand
Rachida Zerrouki	LCSN Limoges

## COMITÉ SCIENTIFIQUE

Le comité scientifique des journées est constitué du Comité scientifique de Pilotage du GDR3544 « Sciences du bois »

<b>Identité</b>	<b>Etablissement</b>
Christophe Belloncle	ESB-Nantes
Laurent Bléron	ENSTIB-Epinal
Sabine Caré	Navier-Champs sur Marne
Bertrand Charrier	IPREM-Pau
Robert Collet	Labomap-Cluny
Myriam Chaplain	I2M-Bordeaux
Patricia Drevet	PIAF-Clermont Ferrand
Frédéric Dubois	GEMH-Egletons
Eric Fournely	Institut Pascal UBP Clermont
Meriem Fournier	LERFoB-Nancy
Philippe Gérardin	LERMaB-Nancy
Stéphane Grelier	LCPO-Bordeaux
Joseph Gril	LMGC-Montpellier
Rémy Marchal	BioWooEB-Montpellier
Corinne Martin	AgroParisTech Nancy
Emmanuel Maurin	LRMH-Champs sur Marne
Patrick Perré	LGPM-ChâtenayMalabry
Frédéric Rouger	FCBA-Bordeaux
Isabelle Théry	CEPAM-Nice
Marie-France Thévenon	BioWooEB-Montpellier
Bernard Thibaut	LMGC-Montpellier
Stéphane Vaiedelich	LRRMM-Paris

## PROGRAMME

	mercredi 4 novembre	jeudi 5 novembre	vendredi 6 novembre
8h00			
8h30			
9h00		<b>Session 3</b> Du matériau à la structure <i>Alaa Chateaufeuf &amp; Yves Perret</i>	<b>Session 4</b> Cycle de vie & transformations ultimes <i>Gérard Deroubaix &amp; Christophe Belloncle</i>
9h30			
10h00	ACCUEIL des participants	<b>Flash-talks C</b>	<b>Flash-talks D</b>
10h30			
11h00	Les 4ème journées scientifiques <i>Christian Larroche</i> (Directeur de Polytech) et <i>Joseph Gril</i>	Café & <b>Posters C</b>	Café & <b>Posters D</b>
11h30			
12h00	<b>Session 1</b> Du gène à l'arbre <i>Jean-Marc Gion &amp; Nathalie Bréda</i>	Repas	Bilan & perspectives <i>Sabine Caré</i>
12h30			
13h00	Repas		Repas
13h30		<b>Session spéciale</b> Economie et retours d'expériences <i>Jean-Marc Roda, Patrick George, Robert Collet, Jean-Pierre Mathé, Florian Thiéfaîne</i>	
14h00			Prix posters & clôture <i>Meriem Fournier</i>
14h30	<b>Flash-talks A</b>		Réunion des contacts des labos
15h00	Café & <b>Posters A</b>		
15h30		Groupes de travail	
16h00	<b>Session 2</b> De la molécule à l'objet <i>Rachida Zerrouki &amp; Claire Alix</i>		
16h30			
17h00		Conférence et repas de gala Départ des bus à 17h15	
17h30	<b>Flash-talks B</b>		
18h00	Visite virtuelle des labos Limoges et Egletons - Démonstrations techniques		
18h30	Groupes de travail		
19h00			
19h30			
20h00	<b>Posters B</b> Encas régional		
20h30			
21h00	Réunion du COFIL		
21h30			
22h00			
22h30			

## GROUPES DE TRAVAIL

titre	animateur	salle
-------	-----------	-------

Groupes de travail : mercredi 4 novembre 18h00 - 19h30/20h00

Imagerie 1	Sabine Caré	G005
Usinage 1	Louis Denaud	G006
Mécanique de la rupture	Frédéric Dubois R. Moutou Pitti	G007
Formation 1 école été	Christophe Belloncle	G112

ATTENTION, la fermeture du bâtiment est à 20 h

Groupes de travail : jeudi 5 novembre 15h00 - 17h00

Imagerie 2	Sabine Caré	G102
Usinage 2	Louis Denaud	G010
Formation 2 ressources num.	Meriem Fournier M-Christine Trouy	G006
Xylothèques	Bernard Thibaut	amphi1
Xylomat	Bertrand Charrier	G131

L'affectation des salles pourra changer en fonction du nombre de participants à chacun des groupes.

Les objectifs des Groupes de travail et les comptes-rendus de réunions sont disponibles sur le site web du GDR 3544 :

<http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/Presentation-generale/Groupes-de-travail>

<http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail>

## PRÉSENTATIONS ORALES INVITÉES

### *Le cycle de vie du bois*

<b>Session 1</b>		<b>Le bois, sa formation, du gène à l'arbre</b>
1-1	GION Jean-Marc	Les apports des approches moléculaires pour la compréhension de la formation du bois
1-2	BREDA Nathalie	Réponse des arbres aux aléas biotiques et abiotiques : les différentes fonctions du bois
<b>Session 2</b>		<b>Le bois, ses valorisations, de la molécule à l'objet</b>
2-1	ZERROUKI Rachida	Vers de nouveaux matériaux pour l'industrie papetière
2-2	ALIX Claire	Savoirs traditionnels et technologie du bois dans l'Arctique
<b>Session 3</b>		<b>Le bois, ses valorisations, du matériau à la structure</b>
3-1	CHATEAUNEUF Alaa	L'apport des approches stochastiques dans le comportement des structures en zones sismiques
3-2	PERRET Yves	Architectures : le bois dans tous ses états
<b>Session 4</b>		<b>Le bois, son cycle de vie et ses transformations ultimes</b>
4-1	DEROUBAIX Gérard	Analyse de Cycle de Vie dans la Filière Bois : enjeux majeurs et questions de recherche
4-2	BELLONCLE Christophe	Le recyclage du bois, contraintes et perspectives
<b>Session spéciale</b>		<b>Économie et retour d'expériences sur projets innovants</b>
S-1	RODA Jean-Marc	Les enjeux mondiaux du commerce du bois
S-2	GEORGE Patrick	Le commerce du bois en Europe de la fin du moyen-Age au 19ème siècle <i>Interventions d'industriels de la filière bois :</i>
S-3	MATHE Jean-Pierre	Chargé de mission prescriptions bois à Auvergne Promobois
S-4	THIEFAINE Florian	Chargé filière bois au Conseil Régional d'Auvergne
S-5	COLLET Robert	Labomap Cluny, pour France Douglas

1-1

## **Les apports des approches moléculaires pour la compréhension de la formation du bois**

GION Jean-Marc<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CIRAD UMR AGAP, Montpellier

<sup>2</sup> INRA UME BIOGECO, Bordeaux

[jean-marc.gion@pierroton.inra.fr](mailto:jean-marc.gion@pierroton.inra.fr)

### **Résumé**

La formation du bois est un processus complexe issu de la différenciation d'un méristème secondaire appelé le cambium vasculaire. Ce processus conduit à un tissu hétérogène et anisotrope dont les propriétés varient au sein de l'arbre lui-même mais aussi entre arbres (espèces, provenances géotypes). Aujourd'hui, les approches moléculaires ont permis de caractériser assez finement les acteurs génétiques et/ou mécanismes moléculaires impliqués dans ce processus et ceux susceptibles d'expliquer la variation des propriétés à la fois au niveau individuel et populationnel. Au départ centrées sur des organismes modèles comme Arabidopsis, ces études se sont étendues à des modèles forestiers comme le peuplier, l'eucalyptus, le pin maritime etc... L'apport des biotechnologies dites à haut-débit (séquençage et génotypage) a permis des avancés considérables sur l'analyse de la nature des gènes de la formation du bois, leur cinétique d'expression et leur régulation. L'évolution des technologies de caractérisation des propriétés du bois a aussi permis l'investigation du contrôle génétique de ces propriétés. Cette présentation propose un bilan général des connaissances obtenues en génétique moléculaire sur la formation du bois, ainsi que certaines perspectives de recherches qui en découlent.

1-2

## **Réponse des arbres aux aléas biotiques et abiotiques : les fonctions écophysologiques du bois**

BREDA Nathalie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR Ecologie et Ecophysologie Forestières  
[nbreda@nancy.inra.fr](mailto:nbreda@nancy.inra.fr)

**Mots clefs :** amidon, aubier, azote, capacitance, ravageur, réserves, sécheresse, stockage

### **Le bois voie de circulation et organe de stockage**

Le bois d'aubier est la partie physiologiquement active du xylème, qui assure le transport de la sève brute des racines vers les feuilles. C'est aussi un lieu de stockage transitoire de réserve en eau et en substances nutritives, en particulier carbonées et azotées. Les cellules vivantes de parenchyme jouent également un rôle actif dans les mécanismes de défense de l'arbre. Du point de vue anatomique, le bois d'aubier est constitué essentiellement de cellules mortes qui assurent le transfert de sève. Les cellules en différenciation dans la région cambiale assurent la fonction croissance secondaire et des cellules de parenchyme permettent le stockage et le transport des composés de réserves.

### **Une réserve d'eau mobilisable lors de pénurie d'eau ?**

Les tissus élastiques (phloème, cambium, couche de subéro-phellodermique) du tronc et des différents organes de l'arbre (racines, branches et feuilles) et l'aubier du tronc et des branches, sont des compartiments de stockage d'eau. Plusieurs études ont indiqué que la principale source d'eau stockée provient de l'aubier ; elle est mobilisée quotidiennement pour assurer le flux transpiratoire puis rechargée la nuit. L'analyse conjointe des variations quotidiennes de circonférence des troncs et de flux de sève des arbres permet de décrire ces phénomènes. Au cours d'une sécheresse exceptionnelle, bien que la transpiration soit réduite par régulation stomatique, une contraction durable des troncs en circonférence est observée. Le cycle circadien n'est plus complet, le déficit hydrique dans le sol entraînant une difficulté croissante pour remplir les réservoirs élastiques. Ce phénomène est souvent observé mais l'estimation du volume d'eau contenu dans ces réservoirs et de sa contribution à la transpiration totale de l'arbre est plus rare. Leurs contributions à la réponse globale de l'arbre lors de sécheresses extrêmes sont discutées.

### **Des réserves de carbone et d'azote pour les périodes de disette**

Les arbres rencontrent périodiquement des périodes de déficits en carbone et en azote induits par une sur-consommation et/ou une réduction de l'assimilation. Ainsi en période de sécheresse ou d'excès d'eau, la photosynthèse est réduite et l'assimilation de carbone est limitée, ainsi que l'absorption racinaire de nutriments et d'azote. Dans le cas d'attaques par des ravageurs (chenilles phytophages, scolytes), les arbres mobilisent un surplus de carbone et d'azote pour réémettre de nouvelles feuilles et pour assurer des mécanismes de défense énergétiquement coûteux (métabolisme secondaire, émission de résines). Les composés non structuraux carbonés (amidon, glucides) sont alors mobilisés dans le bois des organes de stockage, dont le plus gros est le tronc. A partir d'exemples d'arbres défoliés ou soumis à des alternances de contraintes hydriques, nous illustrerons l'effet des contraintes sur l'épuisement du stock de carbone de réserve et/ou sur la limitation de sa reconstitution.

## Références

Barbaroux C., Bréda N. (2002). Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology* 22(17): 1201-1210.

Betsch P., Bonal D., Bréda N., Montpied P., Peiffer M., Tuzet A., Granier A. (2011). Drought effects on water relations in beech: The contribution of exchangeable water reservoirs. *Agricultural And Forest Meteorology* 151(5): 531-543.

El Zein R., Maillard P., Bréda N., Marchand J., Montpied P., Gérant D (2011). Seasonal changes of C and N non-structural compounds in the stem sapwood of adult sessile oak and beech trees. *Tree Physiology* 31(8): 843-854.

Gérard B., Bréda N. (2014). Radial distribution of carbohydrate reserves in the trunk of declining European beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* 71(6): 675-682.

2-1

## Vers de nouveaux matériaux pour l'industrie papetière

ZERROUKI Rachida<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Université de Limoges, Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup>Université du Québec à Trois-Rivières, Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosiques, 3351 boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (QC) G9A 5H7 Canada  
[rachida.zerrouki@unilim.fr](mailto:rachida.zerrouki@unilim.fr)

**Mots clés :** fibres lignocellulosiques, pâte Kraft, modification chimique, valorisation.

### Résumé

L'industrie papetière canadienne souffre depuis quelques années d'une crise économique importante se chiffrant à plusieurs milliards de dollars de pertes, entraînant le licenciement de près d'un quart des employés ainsi que la fermeture de plusieurs entreprises (scieries, usines papetières...). Pour assurer la survie de cette industrie la rendre plus compétitive, des technologies plus innovantes doivent être développées pour intensifier la création de plusieurs gammes de nouveaux produits. C'est dans cette voie de recherche que s'inscrit cette présentation. Elle portera sur les travaux réalisés au Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles de l'Université de Limoges en collaboration avec le Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosiques (CRML) de l'Université du Québec à Trois-Rivières, concernant l'exploration de nouveaux champs d'applications, et de nouvelles voies de valorisations des pâtes papetières (matériau résistant, matériau bioactif...). Ces travaux s'intègrent dans les projets de la chaire d'excellence internationale « Ressources forestières et usages du bois ».

### Références

Faugeras P. -A., Elchinger P. -H., Brouillette F., Montplaisir D., Zerrouki R. (2012) Advances in cellulose chemistry - Microwave-assisted synthesis of propargylcellulose in aqueous medium. *Green Chem.*, 14 (3), 598-600.

Elchinger P. -H., Montplaisir D., Zerrouki R. (2012) Starch-cellulose crosslinking-Towards a new material. *Carbohydrate Polymers*, 87, 1886-1890.

Faugeras P. -A., Elchinger P. -H., Zerrouki C., Montplaisir D., Brouillette F., Zerrouki R. (2012) Tosylcellulose synthesis in aqueous medium. *Green Chem.*, 14, 3126-3131.

Elchinger P. -H., Awada H., Zerrouki C., Montplaisir D., Zerrouki R. (2014) Kraft pulp-starch covalent linking: A promising route to a new material. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53 (18), 7604-7610.

Faugeras P. -A., Brouillette F., Zerrouki R. (2014) Selective crosslinking of Kraft pulp fibres by click chemistry – Characterisation of the properties of reaction intermediates and final product. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 29 (4), 673-678.

Awada H., Elchinger P.-H., Faugeras P.-A., Zerrouki C., Montplaisir D., Brouillette F., Zerrouki R. (2015) Chemical Modification of Kraft Cellulose Fibres: Influence of Pretreatment on Paper Properties. *Bioresources*, 10(2), 2044-2056.

2-2

## **Ethnoarchéologie des savoirs traditionnels et de la technologie du bois dans la région du détroit de Béring**

ALIX Claire<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Université Paris 1 Panthéon Sorbonne / UMR 8096 ArchAm  
[claire.alix@univ-paris1.fr](mailto:claire.alix@univ-paris1.fr) ou [claire.alix@mae.u-paris10.fr](mailto:claire.alix@mae.u-paris10.fr)

**Mots clefs :** Alaska, archéologie, bois flotté, détroit de Béring, Inupiaq, Thulé, Yup'ik

Les sociétés vivant le long de la frange nord du Pacifique, du Japon à la côte du nord-ouest américain, sont bien connues pour leur expertise et leurs savoirs sur le bois et sa mise en œuvre (Mertz 2011, Stewart 1995), une expertise que l'on peut admirer dans la qualité et la diversité de leurs productions. Plus au nord dans les îles Aléoutiennes et le long des côtes du détroit de Béring et de l'Alaska, le bois est moins accessible aux sociétés littorales installées dans un milieu de toundra sans arbre. Pourtant, parmi les objets les plus connus de leurs cultures matérielles, des masques finement sculptés montre le soin apporté à faire ressortir l'expression d'un visage ou d'un animal en exploitant l'esthétique naturelle de la matière première ou par le traitement des surfaces. De fait historiquement, le bois a longtemps fait partie de toutes les activités quotidiennes de ces sociétés et était indispensable à la construction des maisons et des bateaux, à la chasse ainsi qu'à la transformation des aliments (par ex. le fumage du poisson) et à bien d'autres choses. Les instruments et les objets en bois des collections ethnographiques et archéologiques montrent d'ailleurs le fort degré de compétence et de maîtrise du travail du bois en particulier par rapport à la nature de la matière première disponible, ce bois flotté ou bois de rivage qui leur parvenait principalement par la mer depuis les forêts de l'intérieur (Alix 2007).

Les ressources marines – morse, baleine et pinnipèdes, et plus encore la capacité qu'avaient les individus à les chasser depuis la côte ou en pleine mer, à les transformer tout en exploitant l'ensemble des produits qu'elles fournissent, ont joué un rôle essentiel dans le développement des cultures maritimes de la région (Whithridge 1999, Hill 2010). Néanmoins, le succès de ces activités était intimement lié à l'accès et à l'acquisition du bois dans le sens que "pour chasser, il faut sculpter" (Fienup-Riordan 1986). Cette tradition de sculpture s'est transmise de génération en génération dans des régions très précises.

Si le bois était aussi important dans le passé qu'il ne l'a été historiquement (et quand ils sont conservés l'abondance des vestiges archéologiques en est un gage), on peut alors proposer que l'accès au bois et l'acquisition des savoirs et des techniques pour le travailler ont constitué des facteurs clefs du développement de ces cultures maritimes et de l'exploitation réussie de l'environnement marin. Fondé sur des entretiens conduits auprès de sculpteurs Yupiit du sud ouest de l'Alaska et sur l'analyse de vestiges archéologiques de sites du littoral alaskien des deux derniers millénaires, cette présentation s'efforcera de montrer ce qui structure le travail du bois dans cette région septentrionale. Depuis les sources de bois et ses modes d'exploitation aux compétences techniques en passant par leur valeur d'échange et leur sens symbolique, les bois étaient impliqués dans tous les aspects de la vie littorale et de l'adaptation maritime des sociétés du détroit de Béring dans un passé proche et plus lointain.

### **Références**

Alix C. (2007) « Ethnoarchéologie de la production des objets en bois dans l'Arctique nord-américain » In S. Berries et V. Vaté (eds.), Les Civilisations du renne d'hier et

d'Aujourd'hui : Approches ethnohistoriques, archéologiques, anthropologiques, XXVIe Rencontres Internationales d'Antibes, Editions APDCA, Antibes, pp. 377-391.

Fienup-Riordan A. (1996) *The living tradition of Yup'ik Masks: Agayuliyararput (Our Way of Making Prayer)*, University of Washington Press, Seattle. 320p.

Hill E. (2011) « The Historical Ecology of Walrus Exploitation in the North Pacific » In T.J. Braje & T.C. Rick *Human Impacts on Seals, Sea Lions, and Sea Otters : Integrating Archaeology and Ecology in the Northeast Pacific*, University of California Press, pp. 41-64

Mertz M. (2011) *Wood and Traditional Woodworking in Japan*, Ôtsu : Kaiseisha Press, 227p.

Stewart H. (1984) *CEDAR, Tree of Life to the Northwest Coast Indians*. Douglas & McIntyre, University of Washington Press, Vancouver/Seattle, 192p.

Whitridge P. (1999) « The Prehistory of Inuit and Yupik Whale Use » *Revista de Arqueologia Americana*, 16 (1): 99-154

3-1

## **L'apport des approches stochastiques dans le comportement des structures en zones sismiques**

CHATEAUNEUF Alaa<sup>1,2</sup>, FOURNELY Eric<sup>1,2</sup>, BRESSOLETTE Philippe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000  
CLERMONT-FERRAND, FRANCE

<sup>2</sup> CNRS, UMR 6602, IP, F-63178 Aubière, FRANCE  
[alaa.chateauneuf@univ-bpclermont.fr](mailto:alaa.chateauneuf@univ-bpclermont.fr)

**Mots clés :** Analyse de fiabilité, Etude de sensibilité, Réponse sismique, Structures bois.

### **Introduction**

Les structures bois bénéficient d'une grande capacité post-élastique permettant la dissipation de l'énergie apportée par l'action sismique. Néanmoins, la variabilité du matériau, des assemblages et du signal sismique, limite l'exploitation de cette capacité de dissipation pour la conception des structures bois. Dans ce contexte, l'approche stochastique offre des informations pertinentes sur l'impact des différents paramètres sur le comportement des structures bois sous chargement sismique. Le couplage des modèles numériques, expérimentaux et stochastiques permet l'étude de la propagation des incertitudes liées à la nature aléatoire de l'action et au comportement non linéaire des assemblages.

### **Analyse stochastique des structures bois sous chargement sismique**

La méthodologie d'analyse stochastique proposée s'appuie sur une approche multi-échelle, tenant compte de la non linéarité du comportement mécanique sous chargement sismique (Fig. 1). Dans le cadre du projet SISBAT (2013), une loi d'hystérésis bidimensionnelle a été développée par le LMT, sur la base du modèle d'assemblage proposé par J. Humbert (Humbert, 2010). Des essais sur différentes configurations d'assemblages ont été menés par le CSTB pour permettre la calibration de cette loi de comportement.

La résolution du problème stochastique permet l'indentification des grandeurs d'intérêt (i.e. moments statistiques et probabilité de défaillance) à partir des réalisations du modèle éléments finis dans l'espace des variables aléatoires. Deux étapes sont proposées pour l'analyse stochastique (Riahi, 2013) : la première consiste à déterminer la dimension stochastique efficace par une méthode de criblage et la deuxième porte sur l'analyse stochastique par la méthode de réduction de la dimension. Cette stratégie permet d'optimiser le temps de calculs en termes de nombre d'appels au modèle éléments finis.

L'application numérique a été menée sur une toiture industrialisée à combles perdus sous chargement sismique. Les variabilités considérées concernent les matériaux, les assemblages par pointes et par équerres, en plus du signal sismique appliqué. La réponse de la structure est principalement définie par le PGA conduisant à la défaillance de la structure. Cette étude est menée pour trois sites de différents niveaux de sismicité : Guadeloupe, Lourdes et Nice.

L'approche stochastique a montré que l'analyse non linéaire induit une réduction de la variance de la réponse structurale de plus de 50% grâce à l'effet système, d'une part, et à la dissipation d'énergie par endommagement des différents assemblages, d'autre part. Cette forte réduction de la variance permet de dégager des marges supplémentaires vis-à-vis de l'analyse linéaire, étant donné les positions des valeurs caractéristiques par rapport à leurs moyennes respectives.

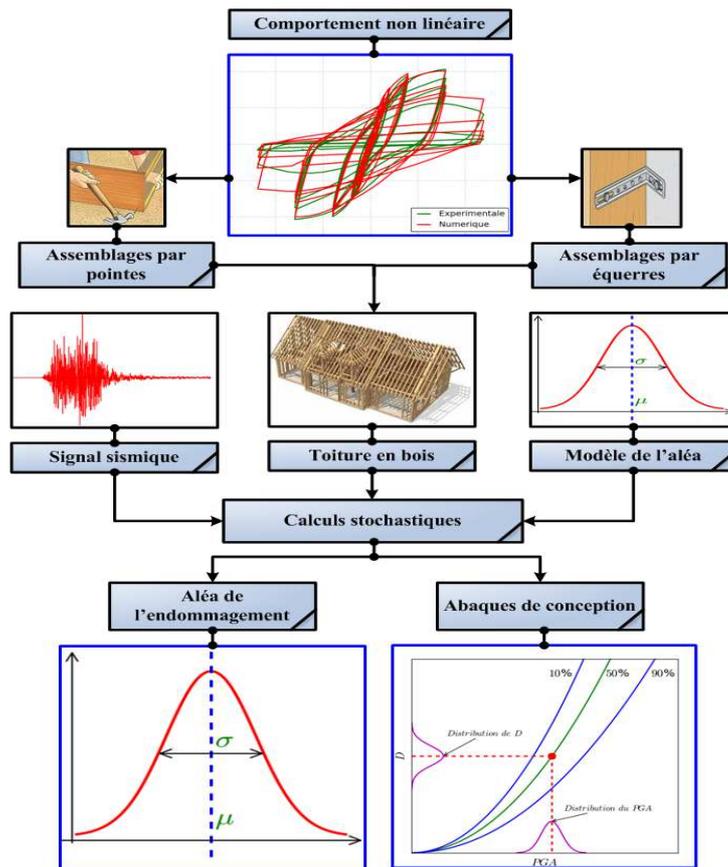


Fig. 1 : Méthodologie de couplage mécano-fiabiliste pour l'analyse des toitures bois.

L'impact du signal sismique est prépondérant sur la variabilité de la réponse structurale. Le coefficient de variation global (structure et signal sismique) est de l'ordre de 35 % pour le site de Guadeloupe et de 25 % pour les sites de Lourdes et Nice. Le coefficient de variation dû aux séismes représente la grande part de ce coefficient (de l'ordre de 32 % et 22 % pour les sites de Guadeloupe et de 22 % pour les sites de Lourdes et Nice).

### Conclusion

Cette étude a permis de montrer l'intérêt de l'analyse stochastique sur des structures réelles en comportement dynamique non linéaire avec une dimension stochastique élevée. Les résultats permettent l'identification et la quantification des phénomènes les plus influents sur la fiabilité de la structure et sur les marges de sûreté supplémentaires qui peuvent être exploitées pour l'optimisation de la conception des toitures industrialisées en bois.

### Références

Humbert J. (2010) Caractérisation du comportement des structures bois à assemblages métalliques sous sollicitations sismiques : Essais expérimentaux, modélisation numérique, analyse de sensibilité, Thèse, Grenoble, France.

Projet ANR SISBAT (2013), Analyse probabiliste de la vulnérabilité sismique de l'habitat avec toiture en charpentes industrialisées en bois - Couplage modélisation probabiliste /expérimentation, ANR RiskNat 2008, projet ANR-08-RISK-008, 2009-2013.

Riahi H. (2013) Analyse de structures à dimension stochastique élevée : application aux toitures bois sous sollicitation sismique, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 8 avril 2013.

3-2

## Architectures : le bois dans tous ses états

PERRET Yves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ARCHITECTE, 8 rue d'Urfé, 42000 SAINT ETIENNE  
[yperret.archi@wanadoo.fr](mailto:yperret.archi@wanadoo.fr)

### Résumé

Nous utilisons du bois dans notre architecture depuis plus de trente ans. Cet exposé présente au travers de réalisations d'hier et d'aujourd'hui la variété des usages possibles du bois dans une perspective écologique (ressource renouvelable au bon bilan CO2), dans une perspective d'orientation économique (choix des essences locales pour favoriser la proximité), dans une perspective technique (innovation, passage du laboratoire au chantier, formation), dans une perspective de qualité de confort des habitants et finalement dans une qualité d'expression poétique (l'architecture est une poésie publique).

Les utilisations du bois présentées iront ;

- Du bois d'œuvre au bois énergie,
- De l'utilisation des bois nobles à la valorisation des déchets (sciure, copeaux, houppes...),
- Des structures au mobilier,
- Des bâtiments aux ouvrages d'art,
- Des bois bruts aux bois très transformés ou associés à d'autres matières



### LE BUCHERON :

Un homme marche dans la forêt jusqu'à la clairière pour s'établir.

Il abat un arbre : poutres et planches pour lever son abri.

Il abat des arbres : clairière plus grande pour établir ses champs,  
grange au fond du pré  
palissade pour les bêtes  
pont sur la rivière

Abattre un arbre empêche t'il de l'aimer ? .....non....!

D'ailleurs le soir, il devient sculpteur et taille à plein bois de mystérieuses figures.  
Il vit ainsi cette étrange fraternité qui l'aide à tenir la tête levée..

Yves Perret Architecte

.... la forêt nous habite...

### EN FORÊT ....

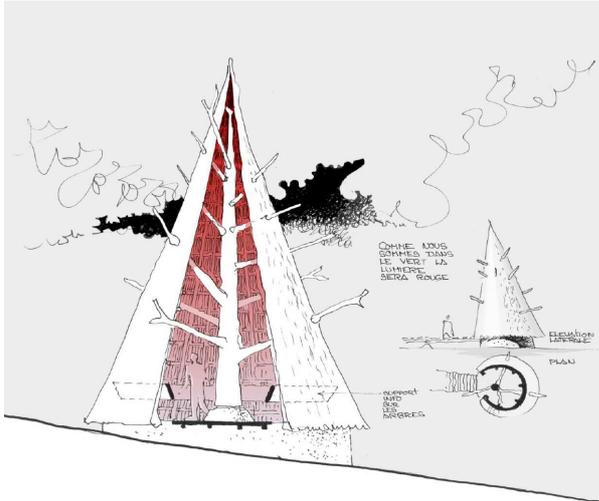


Non, ce n'est pas qu'ils ont inventé la vannerie...

c'est qu'ils s'aiment !

Yves Perret Architecte

Photographie : Jacques Anglade



Pour rêver, vraiment rêver.....  
.....il faut être concret, vraiment concret.....

Dessin extrait d'un rendu de concours en Belgique

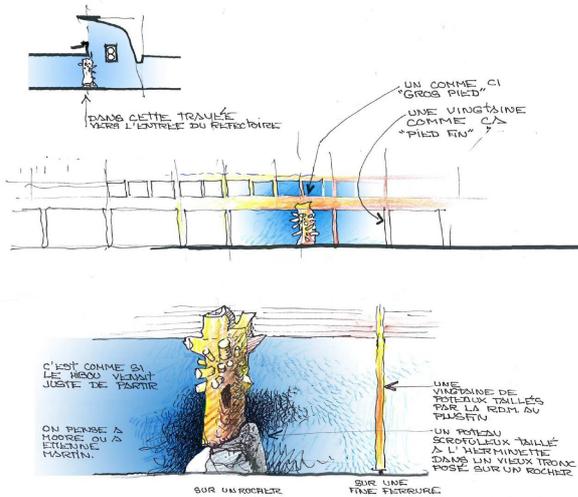
YP



Si nous plantons aujourd'hui un alignement d'arbres,  
Voilà ce qu'auront nos lointains descendants :  
Beaucoup, avec presque rien.  
Et je ne parle pas seulement des innombrables tisanes !

Yves Perret Architecte

Yves Perret Architecte



« Un poteau ne transporte pas que des forces (1) »

Dessin : Yves Perret Architecte

(1) citation : Zanine Architecte



## AU COIN DU BOIS...

Le bois est un matériau sur lequel il est aisé de graver un cœur,  
Le bois est un matériau fragile qui demande attention, entretien donc affection,  
Le bois est un matériau qui appelle la précision,  
Le bois est un matériau technique qui demande d'être savant car il est multiple,  
Le bois est un matériau léger qui permet de travailler à l'atelier et de limiter le temps dans le froid ou la trop grande chaleur,  
Le bois est un matériau renouvelable de proximité... stockeur du C de CO<sup>2</sup>....

Mais tout cela serait rien s'il ne me parlait pas, rassurant comme un arbre, ce vieux frère silencieux !

Je ne construis pas "en bois" mais aussi "avec du bois".

Le béton, la pierre parlent à mes os : ma mémoire antérieure,  
Le bois, la fibre cultivée parlent à mes organes, ma chair : mon intelligence du temps,  
Le verre parle à mes yeux : mon intuition du futur.

Tout un étagement symbolique qui touche mon corps entier :  
rudesse minérale immémoriale  
présent soyeux, ligneux,  
futur acéré ouvert,

de tout mon corps  
par tous mes pores

dans une esthésie à nous écarquiller les oreilles pour faire de nous des êtres éveillés.

Yves Perret Architecte .....

...en un de ces jours où l'on entend l'herbe pousser

4-1

## **Analyse de Cycle de Vie dans la Filière Bois : enjeux majeurs et questions de recherche**

DEROUBAIX Gérard<sup>1</sup>, CORNILLIER Claire<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FCBA, 10 rue Galilée, 77420 Champs sur Marne, France

[gerard.deroubaix@fcba.fr](mailto:gerard.deroubaix@fcba.fr)

**Mots clefs :** Analyse de cycle de vie, impacts environnementaux, changement climatique, fin de vie, aide à la décision

### **Résumé :**

L'Analyse de Cycle de Vie est aujourd'hui une méthode de plus en plus utilisée pour évaluer la performance environnementale des produits et des services. Cette application de l'ACV est basée sur une comptabilité environnementale, consistant à faire le bilan, à chacune des étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service, des consommations de ressources prises dans l'environnement naturel (appelé écosphère) et des émissions de polluants qui y sont rejetées. A partir de cet inventaire de flux élémentaires, des impacts sur l'environnement sont estimés, exprimés sous forme d'indicateurs, en agrégeant ceux relatifs à une même catégorie d'impact à l'aide de modèles de caractérisation (ex : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O pour le changement climatique à l'aide des PRG (pouvoir de réchauffement global)). L'approche globale du cycle de vie (de l'extraction des matières premières à la fin de vie du produit) et l'évaluation multicritères (différentes catégories d'impacts) sont des caractéristiques essentielles de cette méthode d'analyse, afin d'obtenir un profil environnemental le plus complet.

L'ACV fait l'objet de normes internationales (ISO 14040&14044), qui définissent les principes, cadre et les exigences et lignes directrices pour la mise en œuvre de cette méthode.

La réalisation d'une ACV consiste donc dans un premier temps à définir l'objectif et le champ de l'étude, notamment en explicitant la question à laquelle l'analyse doit répondre, ainsi qu'en déterminant les frontières du système étudié, la fonction ou les fonctions rendues par ce système, et l'unité fonctionnelle à laquelle les résultats se rapporteront. Il s'agit ensuite de modéliser le système d'étude (ou cycle de vie) sous forme de processus unitaires (ou étapes, sous-étapes, ...du cycle de vie), qui échangent entre eux des flux de produits, de matière et d'énergie, échangeant eux-mêmes des flux élémentaires avec l'écosphère. Cette modélisation nécessite de disposer de nombreuses données à chacune des phases de cycle de vie, et d'un outil, qui au-delà la modélisation permet de réaliser les calculs d'inventaire de cycle de vie et calculs d'impacts. Les catégories d'impact peuvent couvrir des aspects environnementaux très différents, entre autres l'épuisement des ressources non-renouvelables, le changement climatique, l'eutrophisation. L'interprétation et l'usage des résultats ainsi obtenus dépendent des objectifs de l'étude.

Parmi, les applications actuelles de l'ACV, la plus courante est l'établissement d'un bilan environnemental attribuable à un produit (information environnementale marché). Dans le domaine de la construction, la demande de cette information au niveau des produits entre dans le cadre de la démarche de Performance Environnementale Bâtiment, qui cherche à réaliser ce type d'évaluation à l'échelle de l'ouvrage. Pour réaliser ces calculs au niveau bâtiment, des ACV de produits de construction sont donc nécessaires, ACV dont les résultats sont communiqués sous forme de Déclarations Environnementales Produits (DEP, anciennement FDES). Ces DEP doivent être réalisées selon une norme européenne (NF EN 15804:2012) et son complément français (XP P 01-064/CN:2014), qui y ajoute notamment des informations

sur les questions de santé. Dans le domaine de l'ameublement, c'est un référentiel de bonnes pratiques préparé sous l'égide de l'ADEME et l'AFNOR, le BPX 30-323 qui donne le cadre méthodologique pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation (ainsi que des référentiels spécifiques aux meubles).

L'écoconception de produits est un autre domaine majeur d'utilisation de l'ACV. En effet, par ces principes fondamentaux (approche globale multicritère de l'évaluation), l'ACV doit permettre d'identifier les principales sources d'impact à réduire et aspects prioritaires pour ce faire, ainsi que de vérifier que les solutions d'amélioration envisagées n'entraînent pas de transferts de pollution d'une étape à une autre ou d'une question environnementale à une autre.

Plus globalement, l'ACV peut apporter de l'aide à la décision de façon générale, dans le cadre d'un projet de développement d'un nouveau procédé, d'une nouvelle installation ou activité, ainsi que pour l'évaluation de politiques publiques. Dans le domaine de l'énergie biomasse, l'ACV peut ainsi permettre de juger de la pertinence d'un projet en termes de réduction de consommation d'énergie fossile et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) (les consommations de gasoil liées à la distance d'approvisionnement pouvant dégrader le bilan, le rendement de conversion énergétique pouvant être plus ou moins élevé selon l'installation, ...).

La filière forêt-bois se positionne au carrefour de plusieurs enjeux environnementaux majeurs, qui se traduisent de plus en plus en enjeux économiques. En effet, les services environnementaux de la forêt commencent à être examinés comme externalités positives qui devraient être rémunérées. Par ailleurs la performance environnementale des produits et services est en passe de devenir un critère de choix des marchés et donc un enjeu fort de concurrence entre matériaux. Enfin, les politiques énergétiques et climatiques contribuent à favoriser les produits et services les plus favorables à la protection de l'environnement. Les questions de recherche en matière de méthodologie d'ACV correspondent à ces enjeux.

Le rôle de la forêt et des produits forestiers pour la lutte contre le changement climatique est un enjeu majeur de société, qui présente plusieurs composantes : d'une part l'effet du cycle du carbone biogénique, notamment avec les puits de carbone des forêts et des produits bois, et d'autre part la réduction des émissions de GES d'origine fossile par l'usage de produits et énergies bois moins émissifs que d'autres produits et énergies (effets de substitution). L'évaluation de l'effet sur le changement climatique du cycle du carbone biogénique des produits et énergies bois est actuellement une question méthodologique cruciale et ardue en ACV : comment évaluer le fait que le CO<sub>2</sub> atmosphérique est prélevé dans l'atmosphère par les arbres, qu'il est stocké pendant des durées longues dans les forêts puis dans les produits, qu'il est enfin réémis en fin de vie. A ces questions, s'ajoutent celles de l'échelle des systèmes étudiés, du produit à la région et de l'évaluation sans tenir compte du temps à celle du bilan sur une période donnée. Concernant les émissions de GES fossiles, la quantification des substitutions matière et énergie par rapport à des produits dominants sur le marché (matériaux concurrents et énergies fossiles) pose également des questions de méthode, plutôt centrées sur la modélisation des marchés et l'équivalence fonctionnelle.

Le bois est un matériau recyclable et valorisable en énergie : en fin de vie des produits, des questions importantes sont également posées : celles des impacts évités qui s'avèrent complexes compte-tenu du caractère renouvelable de la ressource; celle de l'analyse de l'utilisation en cascade (voir projet CAREWOOD, poster François Privat), actuellement envisagée comme une option favorable pour maximiser la disponibilité future de ressource.

Dans son utilisation à des fins de production d'informations environnementales par les entreprises, l'ACV présente par ailleurs une difficulté, celle de la complexité de modélisation et du volume de données à recueillir ; ceci constitue une difficulté pour l'appropriation par les

PME qui se trouvent donc handicapées dans la concurrence avec les secteurs constitués de grandes entreprises ; pour répondre à cette question, des ACV collectives sont développées, à partir desquelles un travail de paramétrage, puis de simplification peut-être envisagé pour permettre une individualisation rapide par ces PME, en renseignant un nombre limité de variables influentes.

Au-delà des questions classiques traitées en routine par l'ACV, des préoccupations environnementales émergentes pourraient demain être également évaluées. La question de l'occupation des sols et de l'évaluation des divers impacts potentiels de l'emprise de ces systèmes sur les sols (changement climatique, biodiversité, ...) sont des questions majeures pour les produits et énergies bois, compte-tenu des besoins de sol importants de la sylviculture. Jusqu'à présent, la pratique classique de l'ACV ne prend pas en compte cette source d'impact ou de bénéfice environnemental. Mais ces questions font l'objet de nombreux travaux de recherche qui devraient permettre à court ou moyen terme de faire évoluer les pratiques. La filière forêt-bois doit prendre part à ces travaux de recherche afin que les méthodes d'évaluation soient les plus robustes que possibles et qu'elles ne fassent pas l'objet du jeu des lobbies de la concurrence.

Enfin, dans le domaine de l'aide à la décision, lorsque l'objectif de l'étude est d'évaluer des conséquences à grande échelle sur l'évolution des systèmes actuels de production, les bonnes pratiques (ILCD handbook, 2010) recommandent de réaliser des ACV de type « conséquentiel » et non plus de type « attributionnel ».

Il s'agit là d'un développement en cours pour les questions majeures qui concernent la politique de gestion forestière nationale, celle de l'augmentation significative de récolte pour répondre notamment au développement de l'énergie biomasse ou celle de la priorité éventuelle de l'usage matière sur l'usage énergie. Dans ces cas, l'ACV conséquentielle s'impose, car elle permettra de comparer des alternatives en considérant également les conséquences indirectes de ces choix. La définition des scénarios d'étude fait alors appel à des compétences d'économie qui permettent également d'établir ces conséquences indirectes.

Dans ce domaine relativement jeune de l'évaluation environnementale, si les grands principes sont établis, les méthodes d'analyse sont encore peu figées ; le souhait de prendre en compte de manière plus complète les systèmes étudiés et leur évolution, la diversité des échelles spatiales et le temps fondent la réflexion méthodologique. Les atouts intrinsèques du système forêt-bois ne sont finalement pas évidents à mettre en valeur et des développements méthodologiques sont nécessaires pour tenir compte des spécificités du système (notamment de sa dimension biologique, de son échelle géographique et temporelle), pour une évaluation la plus objective des impacts (positifs et négatifs) de la filière.

4-2

## Le recyclage du bois, contraintes et perspectives

BELLONCLE Christophe, IRLE Mark

LUNAM Université, Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France

[christophe.belloncle@ecoledubois.fr](mailto:christophe.belloncle@ecoledubois.fr)

**Mots clefs :** déchets bois, tri, recyclage, valeur ajoutée

### Résumé

La forêt est un atout important en Europe [1]. La croissance nette observée dans tous les pays européens est mise en avant dans le stockage de CO<sub>2</sub>, une des réponses au changement climatique. Cette dernière est confortée par une utilisation de bois massif comme matériau qui connaît un renouveau, particulièrement dans la construction, alors que la production de produits à base de bois continue sa progression. Dans le même temps, l'utilisation du bois comme énergie renouvelable est également favorisée par de nombreuses politiques régionales, conduisant localement à des tensions d'approvisionnement. Les sous-produits de l'industrie, généralement appelés connexes, sont intégrés depuis de nombreuses années dans l'économie du bois. Estimés à 120Mm<sup>3</sup> en équivalent bois massif [2], et destinés à l'industrie du papier ou des panneaux, ces connexes sont, aujourd'hui, également utilisés comme ressource pour la production d'énergie.

Le déchet bois post-consommateur, c'est-à-dire issu de produits en fin de vie, est alors devenu un enjeu économique. En 2007, le gisement européen en déchet bois a été estimé à 55Mm<sup>3</sup> [2], soit environ 10% des coupes annuelles. Les politiques en matière de déchet ont accompagné cette évolution. De plus en plus strictes, elles favorisent la réutilisation ou le recyclage. Or 37% de ces déchets bois sont toujours destinés à l'enfouissement et 30 % à la production d'énergie.

La difficulté de recyclage réside dans la très grande disparité des produits. Produits d'emballage, d'ameublement, de construction, chacun présentant des caractéristiques différentes [3]. Ceux-ci peuvent être vierge de traitement ou de peinture, contenir des produits de préservation, être des produits reconstitués à partir de bois de grandes ou de petites dimensions, être constitués d'essences différentes... Au-delà du bois lui-même, la contamination par d'autres matériaux (métaux, verre, plastique, colles...) doit être prise en compte. L'ensemble génère des contraintes de qualification de la ressource [4], de réutilisation [5] ou de valorisation matière [6].

L'objectif de cette présentation est de mettre en lumière à l'aide de travaux de recherche en cours, les contraintes de l'utilisation de déchets bois mais également les potentialités.

### Références

[1] FOREST EUROPE, 2015: State of Europe's Forests 2015.

[2] Udo Mantau (2015) Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects , Biomass and bioenergy 79, 28-38. Pour la situation en France voir: Guinard, L., Deroubaix, G., Roux, M.L., Levet, A.L., Quint, V. (2015) Evaluation du gisement de déchets Bois et son positionnement dans la filière bois / bois énergie, ADEME, Avril 2015, consultable sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

[3] Betton, J., (2012) Bilan du recyclage 2001-2010 – Filière Matériaux et filière REP, ADEME

- [4] Bouslamti, A., Irle, M.A., Belloncle, C., Salvador, V., Hulot, S., Caron, B. and Qannari, E.M. (2103) Classification of treated wood using Fourier Transform Near Infrared Spectroscopy and Multivariate Data Analysis, *International Wood Products Journal* 4(2):116-121.
- [5] Irle, M., Privat, F., Deroubaix, G. and Belloncle, C.(2015) Intelligent recycling of solid wood. 9th International Conference of Wood Science and Engineering, 5-7 November, 2015, Brasov, Romania
- [6] Couret, L., Belloncle, C., Irle, M.A. and Cathala, B. (2015) Wood waste: new materials for the production of value-added products. 4th European Polysaccharide Network of Excellence International Polysaccharide Conference, 19-22 October 2015, Warsaw, Poland.

S-1

## Les enjeux mondiaux du commerce du bois

Roda Jean-Marc<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> U.R. *Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits* (BioWooEB) - Cirad, Montpellier, France

<sup>2</sup> University of Putra Malaysia (UPM) - Kuala Lumpur, Malaisie

[jean-marc.roda@cirad.fr](mailto:jean-marc.roda@cirad.fr)

### Résumé

Depuis les années 1990, les filières bois apparaissent séparées en deux mondes aux structures quasiment indépendantes, celui des pays développés et celui des pays en développement. A l'échelle du monde, environ la moitié de la production de bois est utilisée pour produire de l'énergie, et l'autre moitié pour produire du bois d'œuvre ou d'industrie. Le principal ressort de la consommation des bois du monde, et spécialement des bois tropicaux, devient désormais l'urbanisation des pays en transition. Des réseaux d'entreprises ont émergé dans le commerce du bois, qui servent de relais entre les zones forestières et les demandes croissantes liées à l'expansion des entités urbaines des grands pays en transition, parmi lesquels le Brésil, l'Inde et la Chine ont le plus d'influence. Ils supplantent dans les forêts tropicales des industries aux organisations plus traditionnelles, qui avaient dominé jusque dans le milieu des années 1990. Ces réseaux d'entreprises sont d'ordinaire multisectoriels, le bois n'y étant qu'une activité parmi d'autres (agro-industries, machines-outils, logistique, bâtiments et travaux publics, médias). Ils entretiennent des relations où la coopération est calculée sur plusieurs générations, et où la compétition et l'opportunisme sont maîtres. La décision et la production sont décentralisées, et ces entreprises ont un cycle de vie très rapide. Elles ne cessent de se créer et de disparaître pour laisser germer de nouvelles entités ; finalement, les entreprises qui se sont créées au bon moment sur le bon créneau survivent et forment le lien avec les autres entreprises du réseau. L'économie du bois révèle la complexité des mutations de l'économie mondiale, dont les médias se font l'écho en citant les visées de la Chine sur les matières premières d'Afrique, ou l'offensive des multinationales du Sud en Europe. Alors que la politique internationale se préoccupe des enjeux de l'environnement comme des forêts tropicales au même titre que les banquises ou les récifs coralliens, on oublie souvent que de grandes manoeuvres et des batailles économiques ont lieu en ce moment entre multinationales du "sud" et multinationales du "nord" pour le contrôle du foncier, des réseaux commerciaux, de des accès aux marchés en pleine croissance que sont les pays émergents. Parmi les multinationales du Sud, Olam, Wilmar and Sinar Mas, ont commencé comme des conglomerats asiatiques mais jouent maintenant à jeu égal avec les géants du secteur "agrobusiness". Ces géants connus comme les traders ABCD sont Archer Daniels Midland, Bunge, Cargill, Louis Dreyfus. D'autres groupes asiatiques moins connus comme Sime Darby, Ta Ann, WTK, Samling, etc., apparaissent occasionnellement dans les journaux à l'occasion de rapports d'ONG qui dénoncent leur méfaits environnementaux (réels ou pas), où quand les grands fonds d'investissement comme le fond de pension Norvégien annoncent qu'ils en retirent leurs parts. Ces nouveaux réseaux transnationaux opèrent dans tous les continents et tous les secteurs, connectant l'économie du bois à celle du café où aux mouvements de bourses américains ou singapouriens. Ces réseaux connectent les dynamiques asiatiques au reste du monde, spécialement aux enjeux africains. Ils font bouger les lignes sur les questions de la déforestation, de l'accaparement des terres, etc.

S-2

## Le commerce des bois de la fin du Moyen-Âge au XIX è siècle

GEORGE J. Patrick

Spécialiste en bois précieux,  
[george.patrick@orange.fr](mailto:george.patrick@orange.fr)

### Résumé

Matériau naturel, le bois va se rendre indispensable et irremplaçable dans beaucoup de domaines : énergie, constructions de bâtiments, construction navales et mobilier.

Depuis la plus haute antiquité, l'homme a cherché de nouvelles sources d'approvisionnement, à la fois pour palier à un manque de ressource dû à la déforestation et aussi dans une recherche esthétique de matières nouvelles pour la confection de meubles et d'objets d'art. Il ne faut pas non plus oublier la recherche, au milieu des épices, de bois et plantes médicinales et tinctoriales : gaïac, pernamouc, sappan, campèche, santal rouge... .

Nous verrons quelques exemples de commerce dès l'Antiquité : cèdres, ébènes, thuya, sappan ... . Nous parcourrons rapidement le Moyen-Âge pour arriver à la fin du XV è siècle, à l'époque des grandes aventures maritimes et coloniales.

Au tout début du XVI è siècle, le commerce des essences tant exotiques que d'Europe du Nord et de l'Est se développera pour atteindre son apogée à la fin du XIX è siècle. Majoritairement exotiques, les bois importés incluent aussi certaines espèces européennes. Dès le XVI è siècle, des amateurs et des collectionneurs ont été à la recherche de matériaux rares et nouveaux. On peut facilement imaginer que l'arrivée de bois précieux provenant des Amériques, de l'Inde, des Iles, a suscité un grand intérêt chez les amateurs d'arts décoratifs.

Nous évoquerons les grands circuits maritimes qui amenèrent ces bois dans nos ports, en nous attardant sur des essences emblématiques : ébènes, acajous, bois tinctoriaux, chênes et résineux d'Europe du Nord et d'Amérique du Nord. Nous verrons aussi quelques autres espèces moins connues, le citronnier des Indes Occidentales ou espénille, les noyers de Turquie et du Caucase.

La grande difficulté dans l'étude du commerce des bois tient au fait du manque d'archives portuaires, en effet beaucoup furent détruites durant la dernière guerre, de plus les déclarations de cargaisons sur les rôles maritimes étaient parfois très aléatoires et de plus, la dénomination des espèces approximative : bois rouge, bois violet, bois marbré, bois de Sainte Marthe, bois de férol... on voit que la botanique n'a ici aucune place !

Un des pays les plus présent dans l'importation des "bois des Iles" fut la Hollande qui commerça pratiquement avec toutes les parties du monde. L'Espagne et le Portugal furent aussi très actifs, surtout au début de la conquête des Amériques et de l'Extrême Orient. La France et l'Angleterre occupèrent aussi une place importante, grâce à leurs possessions des Antilles, d'Amérique et par la suite à leurs empires coloniaux.

En quantité, les bois les plus importés aux XVII è et XVIII è siècles furent les résineux et les chênes d'Europe du Nord : Prusse, Pologne, Pays Baltes, Russie, Suède, Norvège, puis viennent les bois tinctoriaux : bois de Brésil (pernamouc), campèche, santal rouge ..., les acajous enfin, surtout à partir du XVIII è et durant le XIX è siècle.

Nous verrons aussi l'importance du commerce des bois et les retombées économiques pour les ports de débarquement, de Nantes à Saint-Malo, de Marseille à Bordeaux, du Havre à la Rochelle, de Dieppe à Dunkerque, de Rochefort à Lorient et à Brest.

## POSTERS

*Les résumés des posters sont classés selon l'ordre de passage dans les sessions de flash-talks.*

### **Poster Primés**

**Prix du meilleur poster** (qualité scientifique sur le fond, pertinence du sujet et qualité sur la forme) :

Poster A07 - **Elie PINTA**, ArchAm, Nanterre, L'artisanat de la tonnellerie chez les Norrois, colonie occidentale du Groenland, Xe-XVe siècle

Poster A14 - **Jeanne ROIGNANT**, PIAF, Clermont-Fd, Le bois de flexion du peuplier : une étude de biomécanique intégrative

Poster B08 - **Youness FAYDI**, LaBoMaP, Cluny, Prédiction des paramètres critiques pour le classement mécanique du bois à partir de la mesure de la pente de fil

Poster C12 - **Christian COELHO**, PAPC, Dijon, Impact de l'élevage en fût sur la production d'exsudats bactériens lors d'une fermentation malolactique d'un vin

Poster D11 - **Heba MAKHLOUF**, FCBA Champs-s-M / MSME, Identification du comportement anisotrope du bois par comparaison calcul éléments finis et analyse d'images

Poster D17 - **Imen YAHYAOU**, ICA, Tarbes, Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base du bois

**Prix du poster le plus original** (posters « coup de cœur » pour un ou plusieurs critères, incluant l'accroche du flashtalk) :

Poster A18 - **Cécile LESIRE**, LTB, Gembloux, BE, Impact d'un stockage à long terme en condition d'anaérobiose sur les propriétés physiques et mécaniques de l'Epicéa

Poster B04 - **Wassila DERBAL**, BioWooEB / MPE, Boumerdes, Algérie, Point de saturation de fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie

Poster C08 - **Jialin SONG**, LERFoB, Nancy, Effet de l'environnement sur l'analyse QTL de la ramification du chêne pédonculé

Poster C10 - **Zineb KEBBI BENKEDER**, LERMaB / LERFoB, Nancy, Biodiversité interspécifique des extractibles nodaux

Poster C15 - **Marie BONNET**, Navier, Champs-s-Marne, Essais de compression in-situ dans la direction radiale des bois de printemps et d'été observés par microtomographie aux rayons X

Poster D19 - **Jean Luc COUREAU**, I2M/GCE, Bordeaux, Comportement sol-structure, application au treuillage d'un arbre

**Prix Très Spécial** (poster qui n'aurait jamais existé sans le GDR ...)

Poster D09 - **Isabelle THERY-PARISOT**, CEPAM, Nice, Carbonisation du bois humide ou sec, dépouillement des observations par analyse d'images

<b>Session A (Mercredi 4/11 - présentations 14h-15h, pause/poster 15h-16h)</b>			
<b>n°</b>	<b>Labo, ville</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Titre</b>
A 01	I. Pascal, Clermont-Fd	DJOUBISSIE D. Decroly, MESSAN Adamah, <b>FOURNELY Eric</b> , LAWANE G. Abdou,BOUCHAÏR Abdelhamid, TSOBNANG François	Essais Expérimentaux des connexions par entaille et tige d'acier HA fileté dans les poutres mixtes bois-béton
A 02	I. Pascal, Clermont-Fd	HAMDI Seif Eddine, <b>MOUTOU PITTI Rostand</b> , ANGELLIER Nicolas, DUBOIS Frédéric, CHATEAUNEAUF Alaa	ANR JCJC2013 – Projet CLIMBOIS : Impact des effets environnementaux sur la fissuration des matériaux bois par les intégrales invariantes
A 03	I. Pascal, Clermont-Fd	MOUTOU PITTI Rostand, FARGEIX Philippe, <b>GODI Gael</b> , HAMDI Seif Eddine, ANGELLIER Nicolas, FOURNELY Eric, DUBOIS Frédéric, GARMI Joel	Essais de fissuration des poutres bois en environnements extérieurs non abrités sous charges de longues durée : objectifs et conception
A 04	I. Pascal, Clermont-Fd	DIAKHATE Malick, <b>HAMDI Seif-Eddine</b> , BASTIDAS Emilio, MOUTOU-PITTI Rostand	Contribution de l'émission acoustique et de la PoD au suivi de la propagation de la pointe de fissure dans le bois
A 05	GEMH, Egletons	<b>ANGELLIER Nicolas</b> , DUBOIS Frédéric, MOUTOU PITTI Rostand, DOPEUX Jérôme, ADJOVI LOKO Raoul Spéro	ANR JCJC2013 – Projet CLIMBOIS : Caractérisation expérimentale de la rupture du bois sous ambiance variable
A 06	ArchAm, Nanterre	MÉREUZE Rémi	Des maisons sans toiture : Établir des hypothèses de couverture pour les maisons thuléennes du Cap Eспенberg
A 07	ArchAm, Nanterre	PINTA Élie	L'artisanat de la tonnellerie chez les Norrois, colonie occidentale du Groenland, Xe-XVe siècle
A 08	EcoFoG, Cayenne, Guyane	<b>FLORA Claudiane</b> , DUPLAIS Christophe, ESTEVEZ Yannick, BRUNELLE Alain, THEVENON Marie France, AMUSANT Nadine	Recherche d'indicateurs chimiques de duraminisation pour la prédiction de la durabilité naturelle chez <i>Dicorynia guianensis</i>
A 09	LERMaB, Nancy	RANGEL Geraldine, IBRAHIM Dorra, BASSO Cécilia, LAGEL Marie-Christine, <b>CHAPUIS Hubert</b> , CELZARD Alain, PIZZI Antonio, GERARDIN Christine	Mousses de tannins imperméabilisées par greffage de chaînes hydrophobes
A 10	LERMaB, Nancy	<b>IMBERT Aurélie</b> , CHAPUIS Hubert, DUMARCAY Stéphane, BESSERER Arnaud, FREDON Emmanuel, GERARDIN Philippe, GERARDIN Christine	Vers une filière de valorisation du hêtre en Lorraine : le projet FURALOR
A 11	LERMaB, Nancy	<b>KLEINDIENST Quentin</b> , BESSERER Arnaud, ANTOINE Marie-Laure, PERRIN Christelle, BOCQUET Jean-François, BLERON Laurent	Analyse de la dégradation de bois de hêtre en conditions de service : mise en place d'un guide de suivis des ouvrages
A 12	LERMaB, Epinal	<b>L'HOSTIS Clément</b> , THEVENON Marie- France, FREDON Emmanuel, GERARDIN Philippe	Utilisation de produits bio-sourcés pour la modification chimique du bois à des fins de préservation
A 13	LERMaB, Nancy	<b>LABBE Stéphane</b> , MEAUSOONE Pierre- Jean, AUCHET Sébastien	Mesure dynamique de la puissance d'entraînement des broyeurs

A 14	PIAF, Clermont-Fd	<b>ROIGNANT Jeanne</b> , BADEL Eric, LEBLANC-FOURNIER Nathalie, MOULIA Bruno, DECOURTEIX Mélanie	Le bois de flexion du peuplier : une étude de biomécanique intégrative
A 16	ICCF, Clermont-Fd	<b>ASKANIAN Haroutioun</b> , FENG Ya, COMMEREUC Sophie, ANDANSON Jean- Michel, COSTA GOMES Margarida, VERNEY Vincent	Effect of wood flour treatment on the properties of wood-polymer composites
A 17	LIMATB, Lorient	<b>CAETANO Lydie</b> , GALPIN Bertrand, GROLLEAU Vincent, CAPDEVILLE Jean- Damien	Comportement d'un contre-plaqué de bouleau en conditions sévères
A 18	LTB, Gembloux, BE	RIGUELLE Simon, <b>LESIRE Cécile</b> , HEBERT Jacques, JOUREZ Benoit	Impact d'un stockage à long terme en condition d'anaérobiose sur les propriétés physiques et mécaniques de l'Epicéa
A 19	LTB, Gembloux, BE	<b>VAIANOPOULOS Céline</b> , HEBERT Jacques, JOUREZ Benoit	Variation radiale de l'angle des microfibrilles de cellulose et de la longueur des trachéides chez le Douglas

<b>Session B (Mercredi 4/11 - présentations 17h-18h, encas/poster 19h30-20h30)</b>			
<b>n°</b>	<b>Labo, ville</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Titre</b>
B 01	Panibois, Marcilly en Villette	<b>LAVALETTE Anne</b> , CANILLAS Sabine, DE BUSSAC Olivier	Elaboration d'un procédé de conservation du bois déroulé à l'état vert
B 02	BioWooEB, Montpellier	HU Jinbo, TONDI Gianluca, <b>CANDELIER Kévin</b> , THEVENON Marie-France	Analyse des eaux de lessivage par MP-AES d'un bois traité par des associations tannin-bore
B 03	BioWooEB, Montpellier	<b>GERARD Jean</b> , GUIBAL Daniel, LOTTE Sylvain, LANGBOUR Patrick	Conductivité thermique de bois tropicaux
B 04	BioWooEB / Boumerdes, Algérie	<b>DERBAL Wassila</b> , ZERIZER Abdellatif, GERARD Jean, GUIBAL Daniel	Point de saturation de fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie
B 05	BioWooEB / U. Lomé, Lomé, Togo	<b>SEGLA Kossi Novinyo</b> , KOKUTSE Adzo Dzifa, LANGBOUR Patrick, GUIBAL Daniel, CHAIX Gilles, ADJONOU Kossi, KOKOU Kouam	Etude des propriétés physiques et des paramètres de couleurs de Pterocarpus erinaceus Poir en zones soudanienne, guinéenne et sahélienne
B 06	ArScAn, Paris	MAERKY Gisèle	Les hampes en bois des armes des chasseurs-cueilleurs Yamana et Alakaluf de Patagonie australe : des choix techniques différenciés ?
B 07	ArScAn, Paris	<b>CHICA-LEFORT Tiphanie</b> , ALIX Claire, SHARON Gonen	Technologie du bois végétal au Paléolithique : l'exemple des procédés techniques mis en œuvre par les chasseurs-cueilleurs du Proche- Orient
B 08	LaBoMaP, Cluny	<b>FAYDI Younes</b> , VIGUIER Joffrey, POT Guillaume, DAVAL Vincent, COLLET Robert, BRANCHERIAU Loïc	Prédiction des paramètres critiques pour le classement mécanique du bois à partir de la mesure de la pente de fil

B 09	LaBoMaP, Cluny	<b>GIRARDON Stéphane</b> , DENAUD Louis, POT Guillaume, KREBS Michael, COTTIN Fabrice	Détermination du module d'élasticité effectif par modélisation du déroulage d'un billon et des propriétés mécaniques intrinsèques du bois de peuplier
B 10	I. Pascal, Clermont-Fd	<b>DANG Djily</b> , MOUTOU PITTI Rostand, TOUSSAINT Evelyne, GREDIAC Michel	Identification à l'échelle du cerne des propriétés hydriques du bois par le biais de la méthode de la grille
B 11	I. Pascal, Clermont-Fd	NERGUIDIMA Mathurin, MENECEIER Sébastien, <b>PERISSE Frédéric</b>	Modification superficielle du bois par plasma froid
B 12	I. Pascal, Clermont-Fd	<b>NGUYEN Sung Lam</b> , DESTREBECQ Jean- François	Un modèle incrémental 3D pour le comportement mécanosorptif du bois
B 13	I. Pascal, Clermont-Fd	<b>POUZET Martial</b> , <b>CHARLET</b> Karine, DUBOIS Marc, BEAKOU Alexis	Réactivité de fibres végétales vis-à- vis de la fluoration : vers une réduction de l'hydrophilie du bois
B 14	I. Pascal / GEMH, Clermont-Fd	<b>EL KABIR Soliman</b> , MOUTOU PITTI Rostand, RECHO Naman, LAPUSTA Yuri, DUBOIS Frederic	Etude paramétrique de la propagation de fissure en mode mixte : application au matériau bois
B 15	GEMH, Egletons	NGUYEN Tuan Anh, <b>ANGELLIER Nicolas</b> , DUBOIS Frédéric, ULMET Laurent	Transferts hygroscopiques dans le bois : Caractérisation de champs hydriques par imagerie électrique
B 16	GEMH, Egletons	<b>DUBOIS Frédéric</b> , SAUVAT Nicolas, MANFOUMBI Nicaise, ANGELLIER Nicolas	Comportement différé de poutres en flexion : cas des essences et climats tropicaux
B 17	GEMH, Egletons	<b>SAUVAT Nicolas</b> , DESAUZIERS Valérie, PLAISANCE Hervé, MOCHO Pierre	Qualité de l'air Intérieur et performance énergétique des maisons ossature bois
B 18	GEMH, Egletons	JAMAAOUI Amine, POP Octavian, COSTA Guy, <u>DUBOIS Frédéric</u> , GLOAGEN Vincent, VALLE Valéry	Caractérisation des paramètres de fissuration à partir d'un essai de fendage par coin et la corrélation d'images numériques

<b>Session C (Jeudi 4/11 - présentations 9h30-10h30, pause/poster 10h30-11h30)</b>			
<b>n°</b>	<b>Labo, ville</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Titre</b>
C 01	LCSN, Limoges	<b>PLAZANET Idelette</b> , CAPITAINE Erwan, MOINE Dorothee, POLI Evelyne, LHERNOULD Sabine, COSTA Guy	Le bois de douglas en images...
C 02	LCSN, Limoges	<b>KHALDI Zineb</b> , BESSE Claire, OUK Tan- Sothéa, ZERROUKI Rachida	Elaboration d'un materiau bioactif par greffage du triclosan sur des fibres lignocellulosiques
C 03	ENEF Libreville, Gabon / Québec	MBAGOU Jean Bosco, STEVANOVIC Tatjana, FORTIN Yves, EDOU ENGONGA Prosper, IKOGOU Samuel	Étude de la variation intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et chimiques du Wamba ( <i>Tessmania africana</i> ) en provenance du Gabon
C 04	LERFoB, Nancy	<b>ANDRIANANTENAINA Anjy</b> , RATHGEBER Cyrille B. K., LONGDOZ Bernard, FOURNIER Meriem	Dynamique intra-annuelle de la formation du bois et de la séquestration du carbone chez les résineux et feuillus des forêts tempérées

C 05	LERFoB, Nancy	NOYER Estelle, CONSTANT Thiéry	Analyse du mouvement résultant de la croissance d'un arbre à partir de données T-LiDAR : cas d'étude sur des perches de hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> L.)
C 06	LERFoB, Nancy	NGUYEN Van-Tho, CONSTANT Thiéry, ELHARETH Dehane, PIBOULE Alexandre, COLIN Francis	Analyse de la surface de bois rond pour la détection de défauts internes
C 07	LERFoB, Nancy	PURBA Citra Yanto Ciki, RUELLE Julien, MEAUSOONE Jean-Pierre, OUDJENE Marc, FOURNIER Meriem	Qualification, characterization and valorization of secondary quality beech from thinning
C 08	LERFoB, Nancy	SONG Jialin, BRENDÉL Oliver, BODENES Catherine, KREMER Antoine, COLIN Francis	Effet de l'environnement sur l'analyse QTL de la ramification du chêne pédonculé
C 09	LERFoB / BEF, Nancy	BILOT Nicolas, SAINT-ANDRE Laurent, FOURNIER Meriem, DELEUZE Christine	Le projet EXECLIOR : raisonner la récolte de nos forêt dans le cadre d'une gestion durable de la fertilité des sols
C 10	LERMaB / LERFoB, Nancy	BENKEDER Zineb, TOUHARI Nassim, COLIN Francis, DUMARCAY Stéphane, GERARDIN Philippe	Biodiversité interspécifique des extractibles nodaux
C 11	BFH-AHB, Bienne, Suisse	GROSSE Charlotte, NOËL Marion, GERARDIN Philippe	Bio-polymères d'acide lactique pour la modification chimique du bois
C 12	PAPC, Dijon	RD Alexandre, LESNIAK Clément, COELHO Christian, GOUGEON Régis D, WEIDMANN Stéphanie, GUZZO Jean	Impact de l'élevage en fût sur la production d'exsudats bactériens lors d'une fermentation malolactique d'un vin
C 13	Navier, Champs-s-M	FRANZONI Lorenzo, LEBEE Arthur, LYON Florent, FORET Gilles	Comportement en flexion des panneaux aérés mixtes bois lamellé croisé / isolant
C 14	Navier, Champs-s-M	LAHOUAR Mohamed Amine, CARON Jean-François, PINOTEAU Nicolas	Réponse thermique de quatre essences de bois de construction soumises à un feu normalisé
C 15	Navier, Champs-s-M	BONNET Marie, CARE Sabine, BORNERT Michel, AIMEDIEU Patrick, KING Andrew	Essais de compression in-situ dans la direction radiale des bois de printemps et d'été observés par microtomographie aux rayons X
C 16	Navier, Champs-s-M	PERRET Olivier, DOUTHE Cyril, LEBEE Arthur, SAB Karam	Le flambement linéaire de plaque en lamellé-croisé par un modèle de plaque épaisse
C 17	LGPM, Châtenay-Malabry	CHALLANSONNEX Arnaud, PIERRE Floran, PERRE Patrick	Caractérisation des transferts massiques en régime transitoire de matériaux hygroscopiques à double échelle de porosité : mise en évidence du non-équilibre local
C 18	LGPM, Châtenay-Malabry	LOUËRAT Mathilde, AYOZ Mehdi, PERRÉ Patrick	Calcul de la diffusion thermique équivalente d'un milieu 3D hétérogène par la méthode Lattice Boltzmann

C 19	FCBA / LERMaB, Bordeaux	<b>MALASSET Lise</b> , PODGORSKI Laurence, LANVIN Jean-Denis	Evaluation des propriétés physico-mécaniques des finitions extérieures pour bois : test de dureté Persoz vs test de traction
------	-------------------------------	---	--

<b>Session D (vendredi 4/11 - présentations 9h30-10h30, pause/poster 10h30-11h30)</b>			
<b>n°</b>	<b>Labo, ville</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Titre</b>
D 01	LERMaB, Nancy	<b>SAHA TCHINDA Jean-Bosco</b> ; NDIKONTAR Maurice Kor; DUMARÇAY Stéphane ; GERARDIN Philippe	Etude des propriétés des extractibles de cinq essences camerounaises : ayous, moabi, movingui, padouk et tali
D 02	LERMaB, Nancy	<b>SAHMIM Wissem</b> , CHAPUIS Hubert, SASSI Wafa, DHOUBI Leila, ROCCA Emmanuel, RENAUX Delphine, GERARDIN Christine	Dérivés lipophiles ou gélifiants de composés extractibles du bois de type polyphénolique en tant qu'inhibiteurs de corrosion
D 03	LERMaB, Epinal	<b>SALEM Thouraya</b> , PERRE Patrick, BOUALI Anis, MOUGEL Eric, REMOND Romain	Utilisation des énergies intermittentes pour le séchage du bois : Etude expérimentale et numérique
D 04	LERMaB, Nancy	SALMAN Solafa; PETRISSANS Anélie; DUMARCAY Stéphane, THEVENON Marie France; GERARDIN Philippe	Etude de la résistance du pin sylvestre imprégné par un monomère poly - glycérol / anhydride maléique suivi d'un traitement thermique à différentes températures contre des termites Reticulitermes flavipes
D 05	IPREM / EPCP, Mont de Marsan	<b>MERLE Juliette</b> , BIROT Marc, DELEUZE Hervé, CARRE Hélène, CHARRIER EL- BOUHTOURY Fatima	Synthèse de mousses biosourcées à base de tannins et de lignine
D 06	LabECAM, Lyon	ALTEYRAC Jérôme, VIDAL Marcia	Qualité du bois et matériaux composites à base de bois ; LabECAM Lyon
D 07	IRT, Libreville, Gabon	<b>EKOMY ANGO Serge</b> , LABASSOU HARA David, BAKITA MOUSSAVOU, IKOGOU Samuel, MOUTOU PITTI Rostand	Cinétique de séchage des bois tropicaux : application à l'Okoumé, au Movingui et au paddouk
D 08	IRT,	NDONG MEYE Stevy Lemey, MOUTOU PITTI Rostand, <b>EKOMY ANGO Serge</b> , IKOGOU Samuel	Comportement mécanique de l'Okoumé (Aucoumea Klaineana) soumis à la dessiccation
D 09	CEPAM, Nice	KARAKY Hamzé, THERY-PARISOT Isabelle, FOURNELY Eric, AUDEBERT Philippe, CHERRE Jean-Pierre	Carbonisation du bois humide ou sec, dépouillement des observations par analyse d'images
D 10	ENEF, Libreville, Gabon	PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman, IKOGOU Samuel, MOUTOU PITTI Rostand, EKOMY ANGO Serge	Comportement mécanique de l'Okoumé (Aucoumea Klaineana Pierre) sous sollicitation cyclique en compression
D 11	FCBA / MSME, Champs-s-M	<b>MAKHOLOUF Heba</b> , CHEVALIER Luc, NGUYEN Truong Thi, LAUNAY Eric	Identification du comportement anisotrope du bois par comparaison calcul éléments finis et analyse d'images

D 12	ESB / FCBA, Champs-s-M	<b>PRIVAT François</b> , IRLE Mark, DEROUBAIX Gérard, BELLONCLE Christophe	Vers un recyclage en boucle fermée des déchets en bois massif : transformation d'un gisement hétérogène en produits standardisés
D 13	ESB, Nantes	<b>HOBBALLAH Mohamad</b> , NDIAYE Amadou , IRLE Mark, MICHAUD Franck	Developing new and innovative design principles of wood plastic composite using Innovization techniques
D 14	ESB, Nantes	MICHAUD Franck, HOBBALLAH Mohamad, NDIAYE Amadou, IRLE Mark, <b>Jérôme MOREAU</b>	Optimisation multi objectifs d'un isolant à base de fibres de bois
D 15	ESB, Nantes	<b>SORIN Edouard</b> , LANATA Francesca, BOUDAUD Clément	Suivi de structures en bois en environnement variable via le monitoring
D 16	ICA, Tarbes	<b>RAMANAKOTO Miora</b> , EYMA Florent, RAMANANANTOANDRO Tahiana, GEISLER Jérémy, CASTANIE Bruno	Caractérisation de l'état de surface du bois usiné pour un collage acceptable
D 17	ICA, Tarbes	<b>YAHYAOUI Imen</b> , PERRIN Marianne, GONG Xiaojing	Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base du bois
D 18	I2M/GCE, Bordeaux	<b>BAUDRIT Cédric</b> , ELAICHOUCI Adil, FERNANDEZ Christophe, NDIAYE Amadou	Modélisation descriptive de la bioraffinerie lignocellulosique bois
D 19	I2M/GCE, Bordeaux	COINTE Alain, <b>COUREAU Jean-Luc</b> , Stéphane Morel, Pauline DEFOSSEZ, Frédéric DANJON, Didier GARRIGOU, Jean- Marc BONNEFOND	Comportement sol-structure, application au treuillage d'un arbre

A01

## Essais Expérimentaux des connexions par entaille et tige d'acier HA fileté dans les poutres mixtes bois-béton

DJOUBISSIE D. Decroly<sup>1</sup>, MESSAN Adamah<sup>1</sup>, FOURNELY Eric<sup>2,3</sup>, LAWANE G. Abdou<sup>1</sup>, BOUCHAÏR Abdelhamid<sup>2,3</sup>, TSOBNANG François<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC),  
Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 01 BP 594  
Ouagadougou 01, Burkina Faso

<sup>2</sup> Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000  
Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup> CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France  
[decroly.djoubissie@2ie-edu.org](mailto:decroly.djoubissie@2ie-edu.org)

**Mots clefs :** bois, béton, connexion, entaille, tige d'acier fileté, essais de cisaillement

### Introduction

Le bois étant le matériau du développement durable par excellence, son utilisation comme matériau dans les structures contribue à la réduction de l'impact du changement climatique. Les structures en béton armé étant les plus courantes dans la construction, l'utilisation couplée du bois et du béton dans des structures mixtes se montre avantageux vis-à-vis de la valorisation locale du bois, de la préservation des ressources en granulats et de l'optimisation des performances mécaniques de la structure (Ceccotti, 2002, Fragiaco and Ceccotti, 2006). Le développement de ces systèmes mixtes bois-béton repose sur le développement de connexions de faible coût, disponibles et faciles à mettre en œuvre dans un contexte local ciblé et la maîtrise de leurs comportements au niveau mécanique.

Notre étude porte sur des tests expérimentaux de cisaillement push-out de connexion relativement facile à mettre en œuvre dans des planchers ou poutres mixtes liant bois massif et béton. Les systèmes de connexion sont composés d'une entaille dans le bois d'une part, et d'une barre d'acier à haute adhérence fileté vissée dans le bois d'autre part. La barre d'acier est celle utilisée couramment comme armature pour béton armé. L'objectif est de caractériser mécaniquement ces systèmes de connexion en déterminant leur capacité résistante et leur module de glissement. Les éprouvettes ont été réalisées avec des matériaux disponibles localement et également testées localement dans le laboratoire de l'institut 2iE de Ouagadougou.

### Matériaux, Méthodes

Le bois utilisé provient d'un fournisseur implanté localement et correspond au type de bois utilisé (quand c'est le cas) pour la construction. Les essais de caractérisation réalisés sur des éprouvettes en bois prélevées nous ont permis d'obtenir une masse volumique moyenne de 563,4 kg/m<sup>3</sup>, une contrainte de rupture en compression de 55,51 MPa, une contrainte de rupture en flexion parallèle aux fibres de 97,48 MPa et un module d'élasticité longitudinal en flexion de 12 155 MPa. Sous la base de ses caractéristiques mécaniques, l'essence a été identifiée comme étant du Kosipo (Benoit, 2008).

Les éprouvettes asymétriques de cisaillement confectionnées sont composées de bois de section 65 x 160 mm<sup>2</sup> et de longueur 350 mm, d'une partie en béton de 300 x 350 mm<sup>2</sup> et de 65 mm d'épaisseur sur fond de coffrage de 20 mm d'épaisseur. Des essais expérimentaux de cisaillement ont été réalisés sur six systèmes de connexion (Fig.1) : (1) Entaille triangulaire de 40 mm de profondeur dans le bois ; (2) Entaille rectangulaire de 40 mm de profondeur dans le

bois ; (3) barre HA 10 fixée à 120° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois ; (4) barre HA 12 fixée à 120° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois ; (5) barre HA 10 fixée à 90° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois ; (6) barre HA 12 fixée à 90° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois. Les barres d'acier à haute adhérence (10 mm et 12 mm de diamètre) sont filetées à leur extrémité et vissée dans le bois après un pré-perçage. Les trous devant recevoir les tiges de 10 mm et 12 mm ont un diamètre de 8 mm et 10 mm respectivement. Une presse universelle électromécanique d'une capacité de charge 300 kN avec une centrale de pilotage et d'acquisition des données a été utilisée à cet effet. Chaque éprouvette est chargée à une vitesse (déplacement de la traverse) de 3 mm/min conformément aux prescriptions de la norme EN 26891 (Comité Européen de Normalisation, 1991).

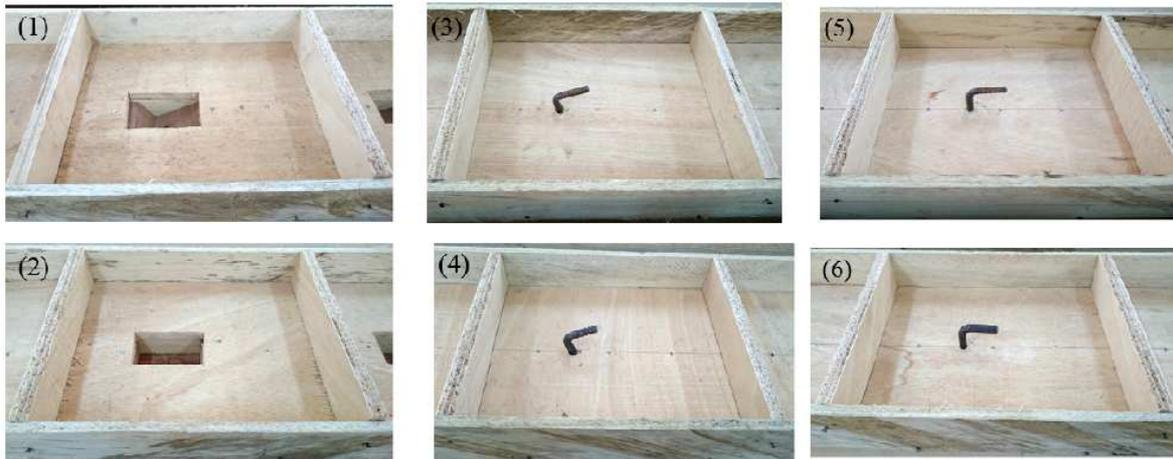


Fig. 1 : Systèmes de connexion testés

## Conclusion

Dans notre étude, nous avons défini des systèmes de connexion faciles à mettre en œuvre dans un plancher ou une poutre mixte bois-béton, avec des matériaux disponibles localement. Les essais push-out ont permis de définir la résistance, la rigidité, la résistance résiduelle et une variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques des configurations de connexion proposées. Les résultats montrent d'une part que les systèmes de connexion par l'entaille sont plus rigides que ceux avec barre d'acier. D'autre part, nous n'avons pas observés de variations notables entre les connexions faites de barre HA 10 et celles faites de barre HA 12. Néanmoins, les systèmes de connexion par barre de haute adhérence vissée à 120° par rapport aux fibres de bois sont plus résistants que les systèmes par des barres fixées à 90°.

## Références

Benoit Y. (2008), *Le Guide Des Essences de Bois*, 2nd édition, Editions Eyrolles.

Ceccotti A. (2002), *Composite Concrete-Timber Structures*, *Progress in Structural Engineering and Materials*, no 3 vol 4, pages 264–75.

Comité Européen de Normalisation (1991), *EN 26891–Structures En Bois - Assemblages Réalisés Avec Des Éléments Mécaniques de Fixation - Principes Généraux Pour La Détermination Des Caractéristiques de Résistance et de Déformation*. Brussels (Belgium).

Fragiacomo M, and Ceccotti A. (2006), *Long-Term Behavior of Timber–concrete Composite Beams. I: Finite Element Modeling and Validation*, *Journal of Structural Engineering*, no 1 vol 132, pages 13–22.

## ANR JCJC2013 – Projet CLIMBOIS : Impact des effets environnementaux sur la fissuration des matériaux bois par les intégrales invariants

HAMDI Seif Eddine<sup>1,2</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,2</sup>, ANGELLIER Nicolas<sup>3</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>3</sup>, FOURNELY Eric<sup>1,2</sup>, CHATEAUNEAUF Alaa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171, Aubière, France

<sup>3</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France

**Mots clefs :** Epreuve MMCG, effets environnementaux, modes mixtes, viscoélasticité

### Contexte de l'étude

Dans les structures en bois l'initiation et la propagation de fissure sont dues aux charges mécaniques, mais aussi aux effets environnementaux tels que la température et l'humidité. Dans ce cas, contrôler le retrait et le gonflement pendant la durée de vie de ces structures reste un défi pour la communauté scientifique et les ingénieurs afin de limiter l'apparition de microfissures et leur propagation (Moutou Pitti et al. 2013). En plus, les effets de la variation de la teneur en humidité combinés à ceux de la viscoélasticité génèrent un surplus de déformations préjudiciables aux structures de bois en service (Moutou Pitti et al. 2014). Ce travail est consacré à l'analyse de la propagation des fissures dans le bois sous l'action combinée de la température ou de l'humidité. L'extension mixte de la fissure est réalisée par l'intégrale invariante  $A_v$  (Moutou Pitti et al. 2010) combinant champs réels et virtuels pour un matériau viscoélastique introduit par un modèle de Kelvin Voigt généralisé. La propagation stable de la fissure est effectuée via l'éprouvette Mixed Mode Crack Growth (MMCG) qui assure une stabilisation du taux de restitution d'énergie, figure 1.

### Matériaux et méthodes

L'éprouvette MMCG (figure 1) est en Douglas et ses constantes élastiques sont les modules d'élasticité longitudinal  $E_l = 15000$  (MPa), radial  $E_r = 1200$  (MPa), et tangentiel  $E_t = 900$  (MPa), le module de cisaillement  $G_l = 700$  (MPa) et le coefficient de Poisson  $\nu = 0,4$ . Ces constantes sont implémentées dans le code par éléments finis Cast3M et les maillages de la figure 2 sont construits. On applique en outre, une distribution de l'humidité dans l'éprouvette bois tout en isolant la pointe de la fissure entourée d'un maillage rayonnant.



Fig. 1 : Géométries de l'éprouvette MMCG

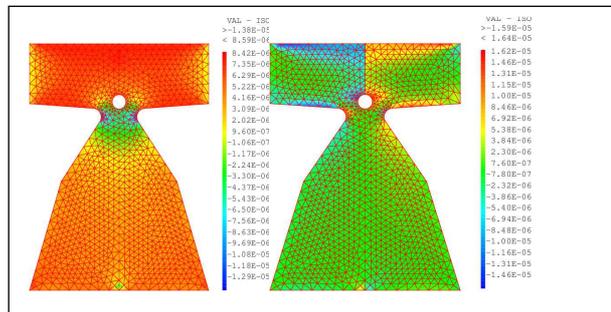


Fig. 2 : Maillages MMCG sous effet de l'humidité

### Résultats numériques et discussion

Les figures 3 et 4 montrent les évolutions des taux de restitution d'énergie en mode I ( $G_1$ ), et mode 2 ( $G_2$ ) en fonction du temps, pour différents taux d'humidité en utilisant l'intégrale invariante  $A_v$ . On note dans un premier temps, une croissance progressive de la zone

d'élaboration (phase de croissance du taux de libération d'énergie) et, dans un second temps, une phase stationnaire avec une stabilisation de l'évolution des taux de restitution d'énergie. Plus précisément, nous observons, un taux de libération d'énergie plus élevé pour la part du mode 2 ( $G_2$ ), ce qui indique que le phénomène de fissuration est conduit par le mode 2.

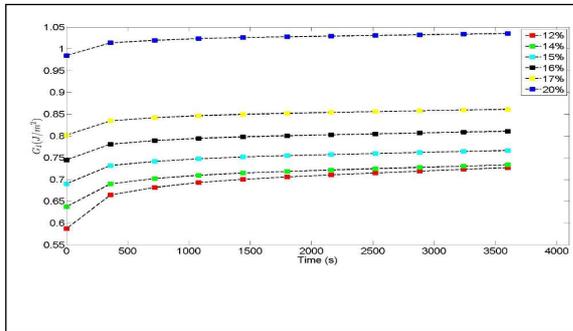


Fig. 3 :  $G_1$  vs. temps et humidité

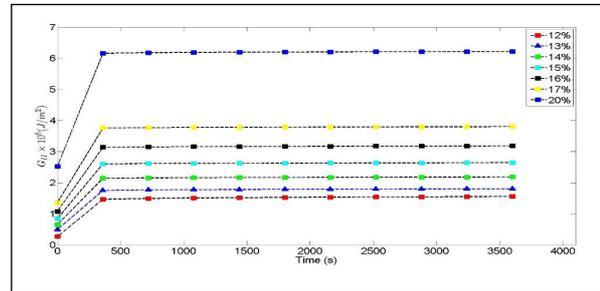


Fig. 4 :  $G_2$  vs. temps et humidité

### Conclusion et perspectives

La prise en compte des phénomènes de fissuration dans les matériaux orthotropes sous l'effet de variations des conditions environnementales telles que la température et l'humidité est nécessaire lors de l'évaluation de la fiabilité des structures en bois. Une formulation viscoélastique par élément finis, qui permet de prendre en compte l'effet d'un chargement hydro-thermique induit par la variation de température et d'humidité, est couplée à l'intégrale A. Une bonne précision est observée sur les estimations du taux de restitution d'énergie viscoélastique en mode mixte en fonction du temps pour différents taux d'humidité. Cependant, la propagation automatique de la fissure doit être effectuée en conséquence par l'imposition d'une valeur critique de taux de libération de l'énergie, qui dépend des propriétés hydromécaniques du matériau bois. Les travaux de recherches à venir permettront de tenir compte de l'effet de la variation de l'humidité sur la fiabilité et la propagation des fissures dans le bois en se basant sur les essais de fissuration en humidité variable (en chambre climatique) effectués actuellement par le partenaire du projet au GEMH d'Egletons.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet JCJC CLIMBOIS ainsi que le pôle de compétitivité ViaMeca pour la labellisation de ce projet.

### Références

- Moutou Pitti R., Fournely E., Hamdi S.E, Ekomy Ango S. 2014. *Performance Testing and Testing Methodologies*, COST ACTION FP1303, Tallinn, 4-5.
- Moutou Pitti R., Dubois F., Petit C. 2010. Generalization of T and A integrals to time-dependent materials: analytical formulations. *Int J Fract.* 161:187–198.

## Essais de fissuration de poutres bois en environnements extérieurs variables sous charges de longue durée : objectifs et conception

MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,2</sup>, FARGEIX Philippe<sup>1,2</sup>, GODI Gael<sup>1,2</sup>, HAMDY Seif Eddine<sup>1,2</sup>, ANGELLIER Nicolas<sup>3</sup>, FOURNELY Eric<sup>1,2</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>3</sup>, GARMI Joel<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171, Aubière, France

<sup>3</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France

<sup>4</sup>Auvergne Promobois, Site de Marmilhat, BP 104, 63370, Lempdes

[rostand.moutou\\_pitti@univ-bpclermont.fr](mailto:rostand.moutou_pitti@univ-bpclermont.fr)

**Mots clés :** Fissuration, Structures bois, effets environnementaux, fluage

### Contexte de l'étude

Le sapin blanc du Massif Central recouvre environ 40% de la région Auvergne et constitue une ressource indispensable aussi bien pour la première et la seconde transformation. En même temps, le Douglas est l'une des essences la plus utilisée en France et notamment dans le Limousin et l'Auvergne. Cependant, en présence de variations d'humidité et de température additionnées aux charges et de longue durée, le comportement mécanique de ces structures se retrouve fortement modifié pouvant compliquer ou limiter leur mise en œuvre.

L'un des objectifs poursuivis par le projet ANR JCJC CLIMBOIS est d'étudier le comportement mécanique des poutres de bois en Sapin Blanc et en Douglas sous l'action combinée des variations climatiques (humidité, température), des charges de longue durée (fluage...) et des défauts initiaux (fissures, nœuds, orientation des cernes de croissance...). Les description et le dispositif des futurs essais présentés ici devraient perdurer au-delà de la fin du projet (mars 2017) et seront réalisés dans un espace extérieur spécialement aménagé au hall Génie Civil de Polytech Clermont-Ferrand.

### Matériaux et méthodes

10 poutres vont être fournies par de l'Association interprofessionnelle Auvergne Promobois, partenaire industriel du projet CLIMBOIS. Ainsi, 3 poutres de chaque essence (Figure 1), serviront aux essais. Une poutre de chaque essence sera utilisée comme poutre témoin pour différentes mesures pendant toute la durée des essais. Les essais seront réalisés, dans un premier temps, sur des poutres en bois massifs. Conformément aux exigences de différentes normes et aux calculs numériques effectués sur des poutrelles, les dimensions suivantes ont été retenues (60 x 180 x 6000 mm<sup>3</sup>), Figure 2.

Tab. 1 : Caractéristiques dimensionnelles des poutres testées

Dimensions	Poutres Sapin Blanc et Douglas
Longueur de la poutre (mm)	3900
Largeur de la poutre (mm)	180
Hauteur de la poutre (mm)	60
Portée entre appuis (mm)	3600
Distance application des forces (mm)	1200
Hauteur de réservation (mm)	90
Longueur de réservation (mm)	380

La figure 1 présente les caractéristiques dimensionnelles des poutres testées et le Tableau 1 résume les dimensions des poutres testées en flexion quatre points.

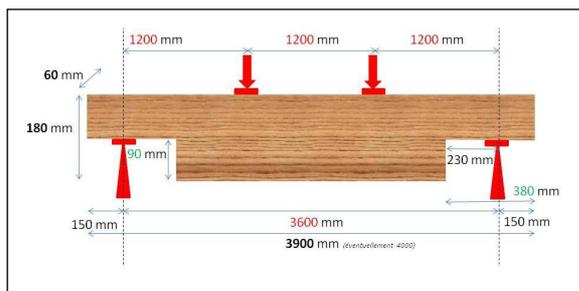


Fig. 1 : Vue de face des poutres testées

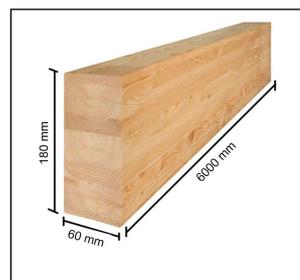


Fig. 2 : Vue en perspective des poutres testées

Le dispositif (Figures 3 et 4) est composé d'un bâti en acier muni des systèmes de fixation pour supporter des charges rectangulaires en béton. Un espace d'environ 1 m est disponible entre les deux dispositifs composés de chaque essence de façon à assurer un espace de manutention satisfaisant. Un espace de 0,5 m sépare les 3 poutres de chaque essence, Fig. 4.

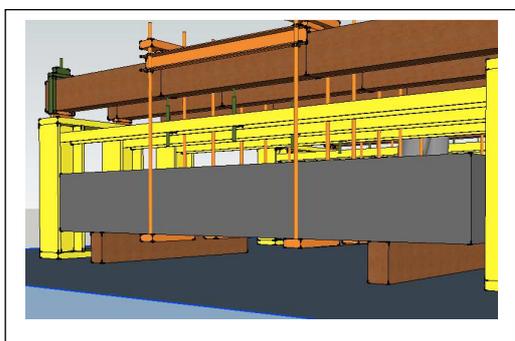


Fig. 3 : Vu de travers du dispositif

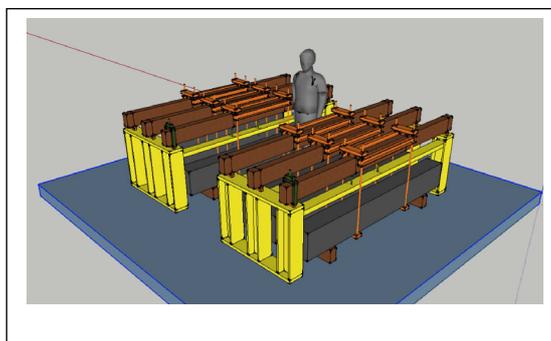


Fig. 4 : Vue de dessus du dispositif

Dans le cadre du protocole expérimental, les six poutres qui serviront aux essais de flexion (livrées avec une longueur initiale de 6 m), seront découpées de 1 m de chaque extrémité. Ces longueurs en extrémité seront utilisées pour divers essais de flexion instantanée. La fissure au droit des entailles ainsi que la flèche centrale en flexion sera mesurée par des capteurs LVDT. Un dispositif d'acquisition sans fil permettra de récolter l'ensemble des données.

### Résultats attendus

La fissuration en fond d'entaille et la flèche induite à la fois par les effets environnementaux et le chargement mécanique de fluage seront mesurées et étudiées. Simultanément. Les résultats attendus pourront améliorer la connaissance de la durée de vie en service des structures bois issues de ces essences et en même temps, optimiser leurs utilisation et leur fiabilité dans de tels environnements.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet ANR JCJC CLIMBOIS N° 13-JS09-0003-01, le pôle de compétitivité ViaMeca pour la labellisation de ce projet ainsi que Auvergne Promobois pour la fourniture des essences testées.

### Références

Moutou Pitti R., Diakhate M., Bastidas Arteaga E., Aounes Y., Angellier N. ANR JCJC N° ANR-13-JS09-0003-01. Projet CLIMBOIS: *Impact des variations climatiques et mécaniques sur la durabilité des constructions bois*. 2èmes Journées du GDR CNRS 3544 « Sciences du Bois », Champs-Sur-Marne, 19-21, novembre, 2013.

A04

## Contribution de l'émission acoustique et de la PoD au suivi de la propagation de la pointe de fissure dans le bois

DIAKHATE Malick<sup>1</sup>, HAMDI Seif-Eddine<sup>2</sup>, BASTIDAS Emilio<sup>3</sup>, MOUTOU-PITTI Rostand<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Bretagne Occidentale, LBMS, 43 Quai de Léon, F-29600 Morlaix

<sup>2</sup>Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand

<sup>3</sup>LUNAM Université, GeM, CNRS UMR 6183/FR 3473, F-44322 Nantes

[malick.diakhate@univ-brest.fr](mailto:malick.diakhate@univ-brest.fr)

**Mots clés :** Bois, Emission acoustique, Fissuration, Probabilité de détection (PoD), Rupture

### Contexte

Le contrôle de santé des matériaux et des éléments de structure repose sur la capacité à identifier les paramètres les plus pertinents pour décrire les mécanismes de fissuration, d'endommagement, et de rupture. Ces mécanismes d'endommagement s'accompagnent d'une libération, sous forme d'ondes, de l'énergie emmagasinée dans le matériau. De nombreux travaux ont montré que l'émission acoustique (EA) est technique de mesure sensible à l'apparition et l'évolution de ces ondes. L'émission acoustique s'appuie sur l'interprétation de la signature numérique de ces ondes.

### Matériaux et méthodes

Dans le cadre du projet ANR JCJC CLIMBOIS (Moutou Pitti et al. 2014), cette étude propose un suivi de la propagation de la pointe de fissure dans le bois (Fig.1). Ainsi, un essai de fissuration Double Cantilever Beam (DCB) est réalisé sur une éprouvette en bois. Les signaux résultant de l'activité acoustique dans le volume de matériau sont enregistrés et post-traités au moyen d'outils de traitement du signal et de statistique.

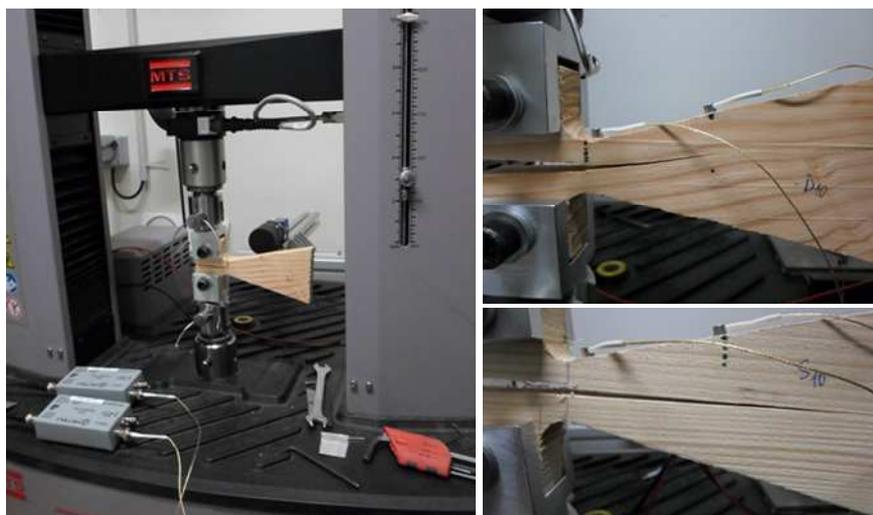


Fig. 1 : Eprouvettes DCB instrumentées pour l'Emission acoustique

### Résultats

Les outils de traitement de signal (Huang 2005), (Hamdi et al. 2013) visent à identifier les paramètres les plus sensibles et pertinents pour détecter et suivre l'avancée de la pointe de fissure. Par ailleurs, ce post-traitement permet de proposer des classifications pour identifier les différents mécanismes de fissuration. Les résultats des essais sur deux essences

de bois (Douglas et Sapin Blanc) ont permis d'identifier ces mécanismes de fissuration, de proposer une localisation de la pointe de fissure, et de suivre son évolution au cours de l'essai (Fig.2).

Les outils statistiques sont appliqués afin d'évaluer la précision des résultats issus du suivi par émission acoustique. En particulier, la Probabilité de Détection est évaluée à partir des données de localisation de pointe de fissure. Des essais de calibrage (méthode du cassé de mines) ont été réalisés afin d'établir la relation entre la position réelle connue et celle résultant de l'analyse de l'activité acoustique dans le matériau (Fig.3).

Les résultats montrent que cette relation est influencée par les conditions expérimentales ainsi que le plan de fissuration dans le bois.

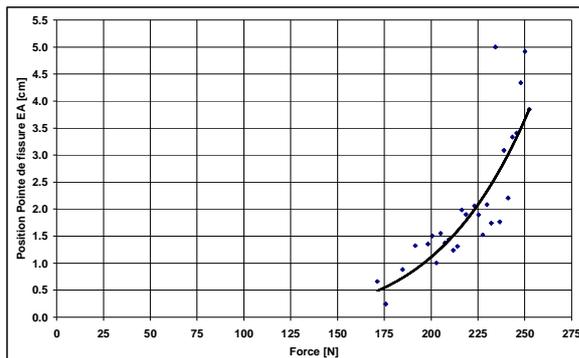


Fig. 2 : Evolution de la pointe de fissure

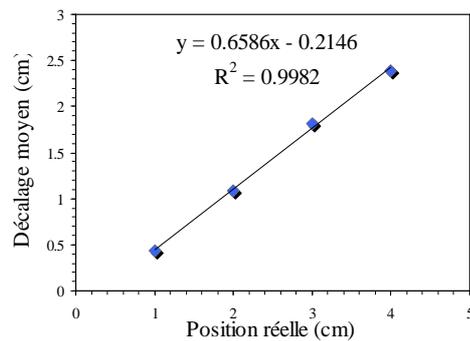


Fig. 3 : Corrélation entre positions réelles et positions EA

## Références

Hamdi, S.E., Le Duff, A., Simon, L., Plantier, G., Sourice, A. and Feuillo, M. 2013. Acoustic emission pattern recognition approach based on Hilbert-Huang transform for structural health monitoring in polymer-composite materials. *Applied Acoustics*, 74: 746-757.

Huang, N.E. 2005. Introduction to the Hilbert–Huang transform and its related mathematical problems. *Hilbert–Huang transform and its applications*.

Moutou Pitti R., Diakhaté M., Bastidas Arteaga E., Aoues Y., Angellier N., Riahi H., Chateaufneuf A., Dubois F. ANR JCJC-2013 Project CLIMBOIS: effects of climatic and mechanical variations on the durability of timber structures: use of acoustic emission tool to evaluate wood mechanical behaviour. COST Action FP1302 Wood Music, Opening Conference. Paris, France, 26- 28 February, 2014

## Remerciements

Dans ce résumé, nous présentons une partie des résultats du projet CLIMBOIS actuellement en cours. Les auteurs souhaitent remercier l'Agence National de la Recherche (ANR) pour avoir accepté de financer ce projet CLIMBOIS ANR-13-JS09-0003-01, ainsi que ViaMéca pour avoir labellisé ce projet.

## ANR JCJC2013 – Projet CLIMBOIS : Caractérisation expérimentale de la rupture du bois sous ambiance variable

ANGELLIER Nicolas<sup>1</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>1</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>2,3</sup>,  
DOPEUX Jérôme<sup>4,1</sup>, ADJOVI LOKO Raoul Spéro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France

<sup>2</sup>Clermont Université, UBP, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171, Aubière, France

<sup>4</sup>PFT Bois Construction, 19300, Egletons, France

[nicolas.angellier@unilim.fr](mailto:nicolas.angellier@unilim.fr)

**Mots clefs :** bois, climat, fissuration, fluage, imagerie

### Contexte de l'étude

La tâche principale du projet CLIMBOIS (Moutou Pitti, 2013) consiste en l'étude de la rupture du bois par le biais de développements analytiques en mécanique de la rupture sous environnements variables avec modélisation numérique de son caractère viscoélastique. Leur validation passe par des essais expérimentaux mis en place afin de caractériser les paramètres de rupture sous ambiance variable. Ce résumé détaille les essences et les géométries étudiées, les chargements mécaniques et hydriques imposés par les montages spécifiques développés, ainsi que les premières modélisations associées.

### Géométries des éprouvettes étudiées et montages spécifiques développés

L'étude de la fissuration à l'échelle laboratoire porte sur deux essences du Massif Central (douglas et sapin blanc). La première géométrie retenue, pour l'étude du mode d'ouverture, a été l'éprouvette Double Cantilever Beam à inertie variable, Fig. 1, pour s'assurer d'une plage de propagation stable de la fissure. La seconde géométrie, pour l'investigation des modes mixtes, est l'éprouvette Mixed Mode Crack Growth, Fig. 1. La démarche aboutit à l'étude de poutrelles avec défauts pré entaillées, Fig. 1, afin de préparer le passage à l'échelle réelle sur des éléments de structure en extérieur, programmée pour la suite du projet. Ainsi, des essais instantanés et de fluage avec découplage des modes sur les éprouvettes de fissuration et de flexion 4 points sur les poutrelles, sous ambiance constante ou variable, sont en cours de réalisation.

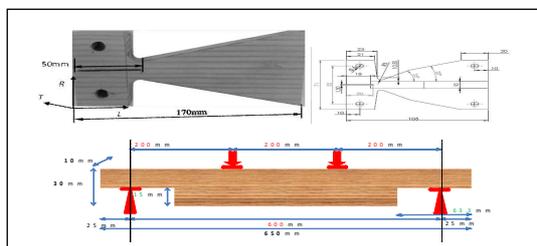


Fig. 1 : Géométries des éprouvettes étudiées



Fig. 2 : Montages spécifiques développés

Dans chaque cas, une première campagne expérimentale est destinée à des essais instantanés à deux niveaux d'humidité, Fig. 2, afin de vérifier les plages de stabilité de la fissure. Pour chaque mode de sollicitation, les taux de restitution d'énergie expérimentaux et leurs valeurs critiques sont évalués. Afin d'étudier une propagation viscoélastique réelle, intégrant les phases d'amorçage et de propagation de la fissure, une seconde campagne expérimentale sur banc de fluage en chambre climatique, Fig. 2, est conduite en ambiance contrôlée pour

alterner les niveaux d'humidité. Les critères d'amorçage sont introduits en termes des taux critiques déterminés précédemment.

### Mesure et modélisation de la fissuration

Le projet prévoit d'utiliser des méthodes CND pour suivre la propagation de la fissure tout au long du processus de rupture. En particulier, des informations globales sont obtenues par analyse d'image, Fig. 3. La méthode de la complaisance, exploitant conjointement les courbes force-déplacements et force-longueur de fissures obtenues, permet d'évaluer les taux de restitution d'énergie.

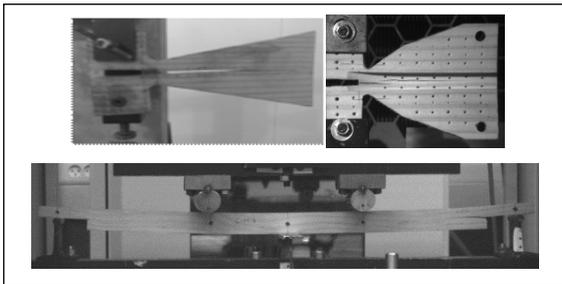


Fig. 3 : Mesure de la propagation de fissure

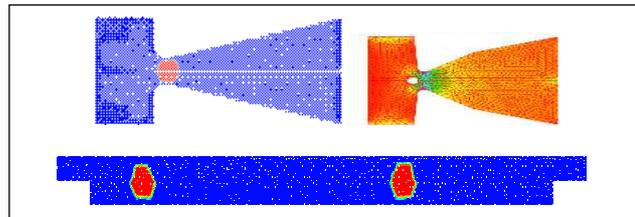


Fig. 4 : Modélisation de la propagation de fissure

Dans une première approche numérique, les éprouvettes sont modélisées et les essais simulés, Fig. 4, pour recalibrer les paramètres élastiques des essences en fonction des niveaux d'humidité étudiés. L'approche permet aussi de remonter aux longueurs de fissures équivalentes (quand elles n'ont pas été directement mesurées), d'évaluer les taux de restitution d'énergie associés et d'extrapoler les valeurs attendues pour des éléments de structure réels.

### Conclusion et perspectives

A l'échelle laboratoire, nous disposons ainsi d'une riche panoplie expérimentale pour l'étude du comportement à long terme des structures en bois sous climats variables. A ce stade, l'étude sur les DCB à inertie variable est finalisée, tandis que les campagnes expérimentales sur MMCG et poutrelles sont menées de front et que des premiers résultats viennent déjà compléter les données collectées jusqu'à présent. Au final, ces données seront confrontées aux prédictions issues d'un calcul éléments finis exploitant les intégrales M et A ; cette comparaison permettra d'affiner les modèles analytiques et numériques développés parallèlement dans le cadre du projet et d'étendre leur application à d'autres types de comportement mécanique. A terme, des essais de structure à l'échelle réelle viseront à caractériser la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques et les défauts du bois.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet JCJC CLIMBOIS ainsi que le pôle de compétitivité ViaMeca pour la labellisation de ce projet.

### Références

Moutou Pitti R., Diakhate M., Bastidas Arteaga E., Aoune Y., Angellier N. (2013) ANR JCJC N° ANR-13-JS09-0003-01. *Projet CLIMBOIS: Impact des variations climatiques et mécaniques sur la durabilité des constructions bois*. 2èmes Journées du GDR CNRS 3544 Sciences du Bois, Champs-Sur-Marne, 19-21, novembre, 2013.

## Des maisons sans toiture : Établir des hypothèses de couverture pour les maisons thuléennes du Cap Espenberg

MÉREUZE Rémi

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8096, Archéologie des Amériques  
[remi.mereuze@gmail.com](mailto:remi.mereuze@gmail.com)

**Mots-clés :** Archéologie, Alaska, culture de Thulé, travail du bois, charpentes, ethnoarchéologie.

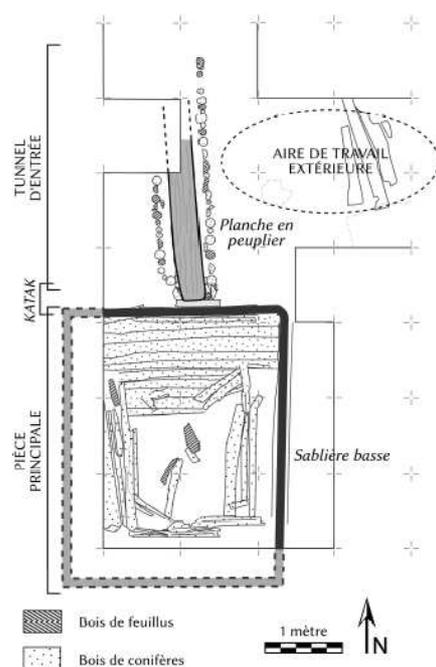
### Introduction

Au nord de la péninsule Seward, en Alaska, le site du cap Espenberg présente une succession d'occupations correspondant à l'ensemble de la période de Thulé, du XII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle, culture considérée comme ancestrale aux inuit actuels (Hoffecker & Mason 2011).

Récemment, plusieurs maisons de ce site ont fait l'objet de fouilles archéologiques. Ces constructions semi-enterrées en bois et sensées être recouvertes de tourbes auraient été utilisées comme habitats d'hiver. A l'instar des autres maisons mises au jour et datant d'avant le Contact avec les Occidentaux et les Russes, ces structures n'étaient que très peu conservées dans leur hauteur et nous ne possédons presque aucune information concernant leur toiture.

### La maison 33 du cap Espenberg

L'une des structures du cap Espenberg, la maison 33, date du XVIII<sup>e</sup> siècle apr. J.-C. (cal. 1675-1778 - Beta-286170, cal. 1675-1778 - Beta-343354) (fig. 1). Celle-ci a fait l'objet de recherches tant sur son mobilier que sur son apparence globale (Darwent *et al.* 2013). C'est à partir des éléments d'architecture encore en place et de ceux qui n'étaient plus en place mais encore présent au sein de la structure que des hypothèses sur son élévation ont pu être proposées. 143 éléments en bois ont été enregistrés sur le terrain pour être étudiés tant du point de vue de leur essence que de leurs indices de travail, comme les empreintes d'outils encore visible sur plusieurs de ces éléments.



### Enquête ethnoarchéologique et vérification des hypothèses

Ces données de terrain ont été comparées aux autres propositions de restitution des modèles de maisons thuléennes ainsi qu'aux données ethnographiques traitant des Iñupiat (les Inuit d'Alaska). Ces dernières correspondent aux explorations du XIX<sup>e</sup> siècle, un peu plus d'un siècle après l'occupation de la maison 33 (à un moment où l'influence occidentale est croissante mais où les Iñupiat conservent encore la majorité des traits de leurs modes de vie traditionnels (Bockstoce 2009)) ainsi qu'aux enquêtes plus tardives dans lesquelles les descriptions des maisons sont souvent plus détaillées et, surtout, qui contiennent des photographies, un type de source indispensable pour restituer une architecture.

Fig. 1, La maison 33 du cap Espenberg

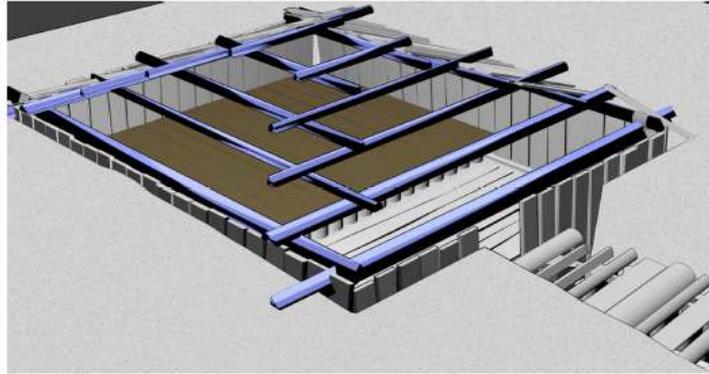


Fig. 2: Charpente modélisée à partir de relevés de terrain et des données ethnographiques dans Blender

Pour comprendre les techniques d'assemblage, il est nécessaire de replacer l'ensemble des éléments architecturaux et des pièces travaillées dans une même réalité virtuelle. Grâce à Blender, un logiciel libre de modélisation 3D, différentes hypothèses d'élévation ont été testées, comme on le ferait avec des maquettes, l'idée principale étant de vérifier la cohérence de l'assemblage des éléments de charpente (fig. 2). Un modèle, basé sur les toitures Yup'ik d'Alaska (Lee & Reinhardt 2003) a été validé en utilisant cette méthode. L'utilisation d'un simple modèle 3D pour réaliser des maquettes des différentes propositions a permis de falsifier une partie des hypothèses.

### Conclusion

A travers une étude ethnoarchéologique, basée sur les vestiges de la maison 33 du cap Espenberg, au moins un modèle de toiture correspondant à l'ensemble des critères, archéologiques et ethnologiques, a pu être proposé quand plusieurs ont été invalidés.

### Références

- Bockstoce, John R. (2009). *Furs and Frontiers in the Far North, The Contest among Native and Foreign Nations for the Bering Strait Fur Trade*, Yale University Press, New Haven.
- Hoffecker, John F. & Owen Mason (2011). "Human response to climate change at Cape Espenberg AD 800-1400: Field investigations at Cape Espenberg, 2011". Annual report to the National Park Service, U.S. Department of the Interior.
- Lee M. & Reinhardt G.A. 2003. *Eskimo Architecture : Dwelling and Structure in the Early Historic Period*. University of Alaska Press, Fairbanks, AK.

A07

## L'artisanat de la tonnellerie chez les Norrois, colonie occidentale du Groenland, Xe-XVe siècle

PINTA Élie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR 8096, Archam (Archéologie des Amériques)

[elie.pinta@malix.univ-paris1.fr](mailto:elie.pinta@malix.univ-paris1.fr)

**Mots clefs :** bois flotté, dendrométrie, économie du bois, établissements norrois, géochimie, Groenland, tonnellerie, xylologie.

### Résumé

À la fin du X<sup>e</sup> siècle, tirant avantage de l'Optimum Climatique Médiéval, les Norrois entament l'étape finale de leur expansion dans l'Atlantique Nord en colonisant les côtes sud-ouest du Groenland, inhabitées à cette période (Fitzhugh et Ward 2000). Ils implantent ainsi leurs établissements à la charnière du monde scandinave et de l'Europe à l'est et des cultures autochtones du Dorset et du Thulé, au nord du Groenland et dans l'archipel arctique canadien. Dans la société norroise, le bois est au cœur des activités quotidiennes. Les colons groenlandais jouissent d'un territoire relativement riche en ressources ligneuses, même si elles font l'objet d'une recherche constante comme l'indiquent les sources écrites. En effet, bien que le bois flotté se soit accumulé depuis plusieurs centaines d'années et que les températures de l'Optimum Climatique Médiéval aient favorisé la croissance des arbustes locaux, les Norrois ont également exploité les forêts du Markland (région du Labrador) tout en continuant à obtenir du bois grâce aux relations entretenues avec l'Islande et l'Europe nordique. Alors que les travaux sur la société scandinave groenlandaise se sont largement développés (Arneborg et al. 2012) et que la question de l'exploitation du bois dans les sociétés autochtones est en plein essor (Alix 2001), il importe aujourd'hui d'étudier systématiquement les techniques de travail du bois et la gestion de ces matières premières chez les Norrois, notamment à travers l'étude des éléments de tonnellerie (tonneau, baquet...). Cette étude est d'autant plus nécessaire que de nombreux vestiges en bois (objets, déchets de fabrications, etc) sont issus de fouilles anciennes et actuelles et n'ont jamais été analysés.

Trois approches seront menées en parallèle pour l'analyse des bois : 1) une étude xylologique et dendrométrique permettra de discuter des critères de sélection des matériaux ; 2) une étude typo-technologique s'attachera à restituer les différentes étapes de la chaîne opératoire du travail du bois ainsi que les procédés techniques de mise en forme des objets ; 3) le développement de référentiels pour des analyses géochimiques (composition chimique des bois et isotopes de strontium) devrait se faire en collaboration avec le *Conservation and Natural Sciences Department* du Musée National de Copenhague et viendra compléter l'étude xylologique et dendrométrique pour déterminer l'origine géographique des bois (Alix et Stimmel 1996 ; Steelandt 2014).

Cette recherche doctorale posera les fondements d'une meilleure compréhension de la gestion et du travail du bois dans la société norroise du Groenland et précisera les relations entretenues avec l'Islande, l'Europe nordique et les sociétés thuléennes qui peuplent le nord du Groenland à partir du XIII<sup>e</sup> siècle environ.

### Références

ALIX C. (2001), Exploitation du bois par les populations néo-eskimo entre le nord de l'Alaska et le Haut-Arctique canadien, Thèse de doctorat, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, France, 611 p.

ALIX C. et STIMMELL C. (1996), « Taking wood to know more about Thule Culture », 29<sup>th</sup> annual conference of Canadian Archaeological association, 1-5 May 1996, Halifax, Nova Scotia.

ARNEBORG J., HEINEMEIER J., LYNNERUP N., MØHL J., NIELSEN H.L., RUD N. et SVEINBJÖRNDÓTTIR Á.E. (2012), « Norse Greenland Dietary Economy ca. AD 980-ca. AD 1450 », *Journal of the North Atlantic*, Special Volume 3 : 1-39.

FITZHUGH W. et WARD (2000) (eds), *Vikings : The North Atlantic Saga*, Smithsonian Institution Press, Washington et London, 432 p.

STEELANDT S. (2014), Disponibilité et exploitation des ressources ligneuses par les paléoesquimaux et les Inuit sur la côte ouest du Nunavik (Québec, Canada), Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, France, 314 p.

A08

## Recherche d'indicateurs chimiques de duraminisation pour la prédiction de la durabilité naturelle chez *Dicorynia guianensis*

FLORA Claudiane<sup>1</sup>, DUPLAIS Christophe<sup>1</sup>, ESTEVEZ Yannick<sup>1</sup>, BRUNELLE Alain<sup>2</sup>,  
THEVENON Marie France<sup>3</sup> et AMUSANT Nadine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR EcoFoG, Cayenne

<sup>2</sup>UPR CNRS, BIOWoEB, Gif-sur-Yvette

<sup>3</sup>UPR BIOWoEB, Montpellier

[claudiane.flora@gmail.com](mailto:claudiane.flora@gmail.com)

**Mots clés :** Alcaloïdes ; *Dicorynia guianensis* ; durabilité naturelle ; duraminisation ; variabilité

### Contexte

*Dicorynia guianensis* (Angélique), l'une des essences les plus exploitées des forêts de Guyane française, est réservée à des emplois divers dans le domaine de la construction (menuiserie intérieure et extérieure, parquet ou charpente) (Amusant et al., 2004). Son bois naturellement durable est connu pour être résistant à l'attaque d'insectes et organismes marins à l'origine de dégradations. Par contre, sa résistance à l'égard des champignons, notamment les lignivores est très variable (de moyennement durable à très durable) (Amusant et al., 2004 ; Anouhe J.B.S et al., 2015). La durabilité naturelle serait en grande partie expliquée par la variation de la composition qualitative et quantitative en extractibles, molécules produites durant le processus de duraminisation (Amusant et al., 2014). A l'issue de ce processus physiologique, les métabolites secondaires sont présents dans le duramen nouvellement formé, stockés dans les parois et les lumens de ses cellules (Taylor A. M. et Gartner B. L., 2002). De plus, certains paramètres environnementaux pourraient aussi influencer la durabilité naturelle du bois (conditions climatiques...) (Moya et al., 2014), ce qui peut constituer une contrainte majeure pour l'utilisateur.

Dans un objectif d'une utilisation rationnelle de la ressource, il importe de comprendre les facteurs à l'origine de la variabilité de la durabilité naturelle. Pour ce faire, il nous faudra identifier les extractibles présents dans le duramen et mettre en évidence leurs rôles dans la résistance biologique du bois à l'égard des champignons lignivores. Il est aussi important de prendre en compte la dynamique de croissance des arbres susceptibles d'être impliquée dans la variabilité observée. A terme, la mise en évidence des marqueurs de durabilité naturelle permettra de proposer des outils de prédictions de la durabilité chez cette espèce à partir d'une carotte prélevée dans l'arbre.

### Références

Amusant N., Beauchêne J., Fournier M., Janin G., Thévenon M.F.. (2004). Analysis of inter-tree and intra-tree variability and relations with wood colour., *Annals of Forest Science*, 61(4), pp. 373-380.

Amusant N., Nigg M., Thibaut B., Beauchêne J.. (2014). Diversity of decay resistance strategies of durable tropical woods species: *Bocoa prouacensis* Aublet, *Vouacapoua americana* Aublet, *Inga alba* (Sw.) Wild., *International Biodeterioration and Biodegradation*, 94, pp. 103-108.

Anouhe J.B.S., Adima A.A., Niamké F.B., Stien D., Amian B.K., et al.. (2015). Dicorynamine and harmalan-N-oxide, two new  $\beta$ -carboline alkaloids from *Dicorynia guianensis* Amsh heartwood., *Phytochemistry Letters*, 12, pp.158-163.

Moya R., Brian B., et Henry Q.. (2014). A Review of Heartwood Properties of Tectona Grandis Trees from Fast-Growth Plantations., Wood Science and Technology 48, n° 2, pp. 411-33.

Taylor A. M., Gartner B. L.. (2002). Heartwood formation and natural durability - a review., Wood and Fiber Science, 34(4), pp. 587-611.

A09

## Mousses de tannins imperméabilisées par greffage de chaînes hydrophobes

RANGEL Geraldine<sup>1</sup>, IBRAHIM Dorra<sup>1</sup>, BASSO Cécilia<sup>2</sup>, LAGEL Marie-Christine<sup>2</sup>,  
CHAPUIS Hubert<sup>1</sup>, CELZARD Alain<sup>3</sup>, PIZZI Antonio<sup>2</sup>, GERARDIN Christine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Faculté des Sciences et Technologies - Université de Lorraine, 54506 VANDOEUVRE-LES-NANCY Cedex, FRANCE

<sup>2</sup>LERMAB, ENSTIB - Université de Lorraine, 88026 EPINAL Cedex, FRANCE

<sup>3</sup>Institut Jean Lamour (IJL), ENSTIB - Université de Lorraine, 88026 EPINAL Cedex, FRANCE

[hubert.chapuis@univ-lorraine.fr](mailto:hubert.chapuis@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs:** hydrophobie, matériaux renouvelables, mousses isolantes, tannins.

### Résumé

Depuis maintenant quelques années, un nouveau type de biomatériau a été développé au sein du laboratoire LERMAB par le professeur Antonio PIZZI et son équipe : les mousses rigides de tannins (Basso (2014), Basso (2013), Tondi (2009), Pizzi (2008), Meikleham (1994)). Cette technologie utilise des tannins condensés naturels, lesquels sont extraits de l'écorce de l'arbre (par exemple le mimosa).

Ce type de matériau figure parmi les plus innovants proposés dans le domaine au cours des dernières années. La synthèse des mousses met en présence les tannins et l'alcool furfurylique qui sont tous deux des espèces chimiques relativement bon marché et dérivées de la biomasse. Les mousses obtenues présentent une faible conductivité thermique, des propriétés d'auto-extinction et de retard de flamme qui les rendent développables dans le cadre de différentes applications industrielles. Malheureusement, ce type de matériau souffre habituellement d'une faible durabilité du fait de sa forte propension à absorber l'humidité, ce qui diminue ses performances.

La solution apportée par ce travail comprend deux étapes: la formation des mousses et l'hydrophobisation du matériau (Figure 1). De plus, ces deux étapes sont interchangeables comme nous le montrerons ici. Les matériaux obtenus ont été caractérisés par des méthodes chimiques (IR, MALDI-TOF) et des méthodes physiques (imperméabilité, friabilité, conductivité thermique).

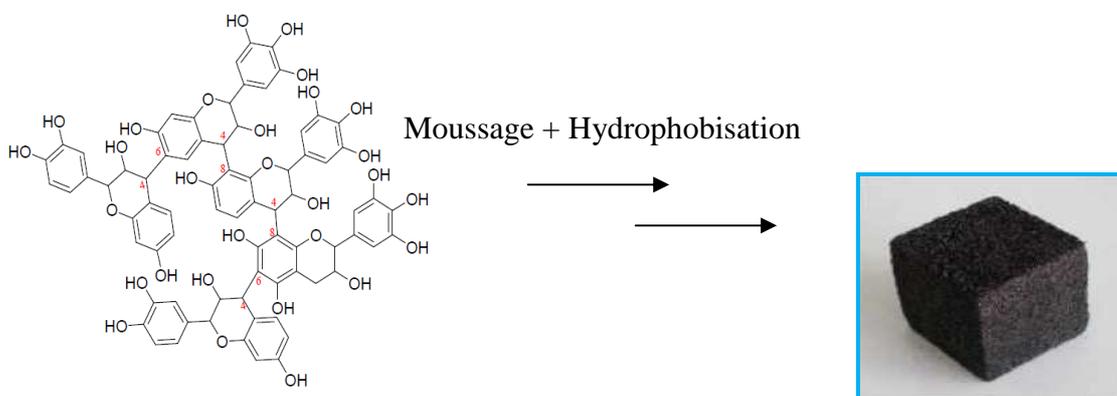


Fig.1: Accès à des mousses hydrophobes issues de tannins de mimosa.

## Références

Basso M. C., Pizzi A., Celzard A. (2013) Influence of formulation on the dynamics of preparation of tannin based foams, *Ind.Crops & Prod.*, 51: 396–400.

Basso M. C., Pizzi A., Lacoste C., Delmotte L., Al-Marzouki F. A., Abdalla S., Celzard A. (2014) Tannin-furanic-polyurethane foams for industrial continuous plant lines, *Polymers*, 6: 2985-3004.

Meikleham N., Pizzi A. (1994) Acid and alkali-setting tannin-based rigid foams, *J.Appl.Polymer Sci.*, 53, 1547-1556.

Pizzi A., Tondi G., Pasch H., Celzard A. (2008) MALDI-TOF Structure determination of complex thermoset networks – Polyflavonoid tannin-furanic rigid foams, *J.Appl.Polymer Sci.*, 110 (3): 1451-1456.

Tondi G., Pizzi A. (2009) Tannin based rigid foams: characterisation and modification, *Industrial Crops & Products*, 29(1-2): 356-363.

Tondi G., Zhao W., Pizzi A., Fierro V., Celzard A. (2009) Tannin-based rigid foams: a survey of chemical and physical properties, *Bioresource Techn.*, 100: 5162-5169.

## Vers une filière de valorisation du hêtre en Lorraine : le projet FURALOR

IMBERT Aurélia<sup>1</sup>, CHAPUIS Hubert<sup>1</sup>, DUMARCAY Stéphane<sup>1</sup>, BESSERER Arnaud<sup>2</sup>,  
FREDON Emmanuel<sup>2</sup>, GERARDIN Philippe<sup>1</sup>, GERARDIN Christine<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LERMaB, EA 4370, USC INRA, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, Bld des Aiguillettes, BP 70239. F – 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex  
<sup>2</sup> LERMaB, EA 4370, USC INRA, Université de Lorraine, ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin.  
F – 88000 Epinal

[aurelia.imbert@univ-lorraine.fr](mailto:aurelia.imbert@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Composite - Feuillus - Furfurylation – Hémicellulose - Hydrolyse - Modification chimique - Préservation

### Résumé

Le projet FURALOR, soutenu par l'Agence de Mobilisation Economique de la Région Lorraine, s'inscrit dans le contexte général de la préservation du bois à travers des techniques innovantes non biocides comme le traitement thermique ou la modification chimique. Le sujet de recherche vise plus particulièrement l'utilisation de déchets de bois de feuillus pour produire des monomères furaniques biosourcés, ainsi que l'amélioration de la durabilité et la stabilité dimensionnelle du bois de hêtre grâce à une polymérisation *in situ* de ces monomères furaniques (furfurylation).

La production du furfural, bien connue par ailleurs à partir de matériel végétal, a été réalisée ici à partir de sciure de hêtre, par hydrodistillation dans des conditions fixes de température et de pression, après mise au point de plans d'expérience. Les paramètres étudiés ont été : le type d'acide, sa concentration, la taille des particules, etc. Les premiers résultats montrent l'importance du choix de l'acide et de sa concentration sur le rendement en furfural.

La réduction par donneur d'hydrogène, en conditions douces, de ce monomère en alcool furfurylique a été mise au point. Cette réduction est possible à une température ambiante et sans utiliser d'hydrogène gazeux.

Enfin des composites ont été réalisés par imprégnation d'éprouvettes de hêtre par une solution d'alcool furfurylique puis polymérisation. Différents essais de formulation ont été réalisés, en maintenant par exemple une concentration fixe en alcool furfurylique, tout en modifiant celle du catalyseur. Différentes caractérisations ont été réalisées sur ces éprouvettes : Essais biologiques, tests mécaniques, etc. Les tests anti-fongiques ( vis-à-vis de *Coriolus versicolor*) montrent ainsi que la durabilité augmente parallèlement à la concentration en catalyseur. Le traitement par ce type de formulations n'entraîne pas l'apparition de fissures dans le bois, et il n'y a pas de modification des propriétés mécaniques par rapport au bois non traité.

### Références

- BAMUFLEH, H.S., ALHAMED, Y.A., DAOUS, M.A. (2013) Furfural from midribs of date-palm trees by sulfuric acid hydrolysis. Industrial crops and products, vol. 42, p. 421-428.
- ESTEVEZ, B., (2011) Properties of fufurylated wood (Pinus pinaster). Eur. J. Wood Prod, 69, p.521.
- GARCIA-DOMINUEZ, M.T., GARCIA-DOMINGUEZ, J.C., FERIA, MJ., et al. (2013) Furfural production from Eucalyptus globulus : Optimizing by using neural fuzzy models. Chemical engineering journal, vol. 221, p. 185-192.

HOYODONICKX, H., (2011) Biomodification : La technologie de la furfurylation. Le courrier du bois, 170, p.29.

LANDE, S., (2008) Development of modified wood products based on furan chemistry. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 484, p.367.

MANSILLA, H.D., BAEZA, J., URZUA, S., et al. (1998) Acid-catalysed hydrolysis of rice hull : Evaluation of furfural production. Bioresource technology, vol. 66, p. 189-193.

ZHANG, T., KUMAR, R., WYMAN, C.E. (2013) Enhanced yields of furfural and other products by simultaneous solvent extraction during thermochemical treatment of cellulosic biomass. RSC Advances, vol. 3, p. 9809-9819

A11

## Analyse de la dégradation de bois de hêtre en conditions de service : mise en place d'un guide de suivis des ouvrages

KLEINDIENST Quentin<sup>1</sup>, BESSERER Arnaud<sup>1</sup>, ANTOINE Marie-Laure<sup>1</sup>, PERRIN Christelle<sup>1</sup>, BOCQUET Jean-François<sup>1</sup>, BLERON Laurent<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lermab, 27 rue Philippe Seguin, 88000 Epinal  
[quentin.kleindienst@univ-lorraine.fr](mailto:quentin.kleindienst@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** Activité enzymatique, champignons, colonisation, dégradation, hêtre, pieux, résistance mécanique.

### Introduction

Le hêtre est une essence très présente en Lorraine, et plus largement à l'échelle nationale. Cette essence, anciennement prisée, particulièrement dans l'ameublement et l'industrie subit une forte concurrence de la part d'autres matériaux, en particulier des nombreux types de panneaux (panneaux de particule, MDF,...), d'où la nécessité de trouver de nouveaux débouchés pour valoriser cette essence locale très abondante. Ainsi, de par ses propriétés mécaniques intéressantes, cette essence pourrait convenir pour une utilisation en pieux de fondation. Ce procédé, largement utilisé dans certains pays (Etats-Unis, Hollande) est sous employé en France où il a pourtant été très utilisé auparavant, comme en témoigne les nombreux ouvrages anciens bâtis sur ce type de fondation (1).

Cependant, le hêtre est non durable vis-à-vis de la dégradation par les organismes lignocellulolytiques (2). Par conséquent, la connaissance des modes de dégradation, mais également des cinétiques de développement des différents organismes de dégradation (principalement les champignons lignivores) est primordiale pour envisager l'utilisation du hêtre en pieux de fondation.

### Dispositif expérimental

Deux conditions de mise en œuvre des pieux sont envisageables :

- Un enfouissement total où le bois n'est pas en contact avec l'air. La liaison avec la base du bâtiment peut être assurée par une partie en béton.
- Les pieux peuvent également comporter une partie aérienne (cas de structure légère de type passerelle).

La figure 1 illustre le dispositif expérimental mis en place pour étudier ces deux cas de figure.

Différentes mesures ont été effectuées sur les éprouvettes issues de ce dispositif :

- Mesure d'activités enzymatiques (activités laccase, glucosidase et xylosidase).
- Mesure de la contrainte à rupture en compression longitudinale.
- Evaluation du taux de colonisation des éprouvettes par le mycélium, par microscopie optique.
- Mesure de l'humidité des éprouvettes.

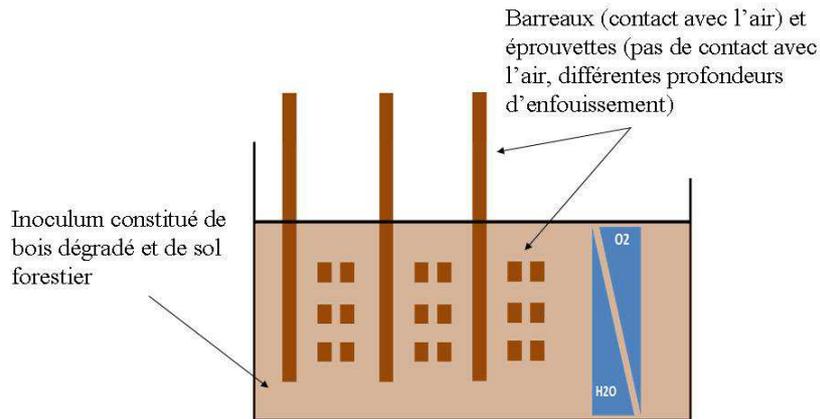


Fig. 1 : Schéma du dispositif expérimental

## Conclusion

Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre l'effet de la migration de l'humidité dans le bois sur le développement des champignons de dégradation. Nous avons pu également montrer que l'activité de dégradation (activité enzymatique) et la perte de résistance mécanique sont liées au taux d'humidité du matériau mais ne corrèlent pas avec le taux de colonisation du bois. L'analyse des différents facteurs a permis de déterminer un diagramme de prédiction de la dégradation du bois de hêtre dans le sol. Il devient alors possible, à partir d'échantillons prélevés sur site, de déterminer précisément si le pieu est attaqué ainsi que le stade du processus de dégradation. Cela ouvre la voie à des prédictions à moyen terme des capacités de résistances de pieux de fondation en situation de marnage.

Enfin, les résultats obtenus montrent clairement la grande différence entre les deux modes de mise en œuvre sur la création de conditions favorables au développement de champignons lignocellulolytiques.

## Références

1. Christin J. Système de fondation sur pieux bois: une technique millénaire pour demain [Internet]. Université Paris-Est; 2013 [cité 11 sept 2015]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00878972/>
2. Brischke C, Bayerbach R, Otto Rapp A. Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Mater Sci Eng.* sept 2006;1(3-4):91-107.

A12

## Utilisation de produits bio-sourcés pour la modification chimique du bois à des fins de préservation.

L'HOSTIS Clément<sup>1</sup>, THEVENON Marie-France<sup>2</sup>, FREDON Emmanuel<sup>1</sup>,  
GERARDIN Philippe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LERMaB, EA 4370, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70  
239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup> CIRAD, UR BIOWoEB, TA B-114/16, 73 Rue Jean-François Breton, F-34398 Montpellier  
CEDEX 5, France

[clement.l-hostis@univ-lorraine.fr](mailto:clement.l-hostis@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Acide Citrique, Biodégradation, Glycérol, Hêtre, Lessivage, Polyester, Préservation.

### Contexte et mise en place de l'étude

La préservation est actuellement une problématique majeure pour l'industrie du bois. En effet, certains emplois nécessitent d'apporter un traitement à ce matériau naturellement sujet à la biodégradation, afin d'éviter les attaques de différents organismes. Ainsi, notamment en ce qui concerne les poteaux, les traverses de chemin de fer (classe d'emploi IV) ou encore pour les terrasses ou bardages (classe d'emploi III), l'utilisation d'essences peu durables nécessite la mise en œuvre d'un procédé de traitement efficace. Les procédés actuels, présentent toutefois des inconvénients majeurs : leur impact environnemental important est largement reconnu, et leur utilisation est de plus en plus drastiquement limitée par la réglementation, au travers de la Directive Biocides et Reach. Si le traitement thermique, qui est aujourd'hui développé, apporte une amélioration au bois en termes de résistance aux attaques biologiques, son efficacité reste moindre que les procédés cités précédemment, et ne permet pas de l'utiliser en classe d'emploi IV. De plus cette technique affaiblit largement les propriétés mécaniques du matériau, le rendant inopérant pour des emplois structurels.

Il devient alors nécessaire de proposer des traitements alternatifs présentant des performances comparables et dont l'impact environnemental est autant limité que possible. La modification chimique du bois présente de ce point de vue des qualités notables. Notre approche se porte sur la polymérisation *in situ* de monomères bio-sourcés au potentiel de développement important.

Les premiers essais permettant de valider notre approche ont été conduits à partir d'acide citrique et de glycérol, précurseurs de polyesters. Les formulations de produits de traitement sont réalisées en mélangeant à froid les monomères sous agitation magnétique et en y ajoutant de l'eau distillée, afin de diminuer la viscosité du mélange et de faciliter l'imprégnation. Les éprouvettes de hêtre (*Fagus sylvatica*) sont ensuite imprégnées par un procédé vide-pression et chauffées en étuve à des températures allant de 103°C à 160°C pour obtenir une polymérisation.

L'étude de leur résistance au lessivage et à la biodégradation a été réalisée, afin de s'assurer de la pérennité du traitement.

### Résultats obtenus

Après un traitement à 103°C, les différentes formulations employées ont mis en évidence le fait que la résistance au lessivage était dépendante de la formulation. Typiquement, le taux de lessivage atteint un seuil de 10% à partir d'une formulation présentant un rapport de fonctions COOH/OH voisin de 0,5. La température choisie pour la polymérisation joue également un

rôle important sur le lessivage. Ainsi nous avons pu observer qu'un chauffage au-delà de 120°C permet d'obtenir des taux de lessivage proches de 0%.

La résistance à la biodégradation a été évaluée en plaçant des éprouvettes traitées selon ce procédé en présence de *Coriolus versicolor* (pourriture fibreuse) pendant 6 semaines. Là encore, la formulation de traitement employée impacte largement les résultats. Plus la concentration d'acide est élevée, plus la résistance est importante. Des pertes de masses de 1% ont été atteintes pour des éprouvettes traitées contre plus de 10% pour les échantillons de référence, témoignant de l'efficacité du traitement de ce point de vue.

Comme premiers éléments de conclusion, nos résultats tendent à montrer que lorsque la proportion d'acide citrique est suffisante, celui-ci se greffe sur le bois. Cet effet contribue à la résistance au lessivage et à la biodégradation, en plus de la polymérisation.

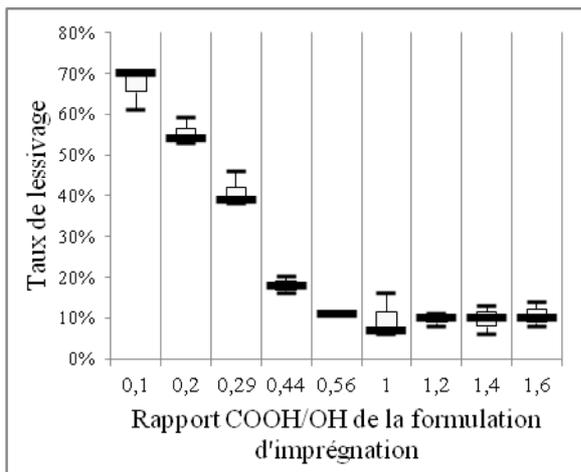


Fig. 1 : Taux de lessivage en fonction du rapport COOH/OH des formulations d'imprégnations

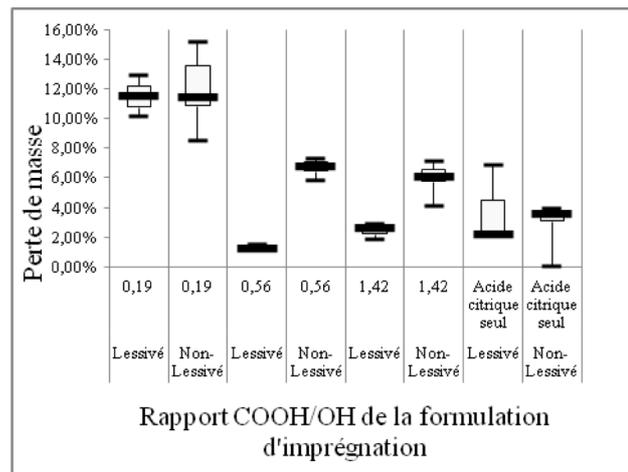


Fig. 2 : Résistance à la biodégradation : Perte de masse des éprouvettes en fonction du rapport COOH/OH après 6 semaines de mise en présence de *Coriolus versicolor*

Les travaux recherche ayant conduit à ces résultats sont soutenus par un financement du Programme de recherche WoodWisdom-Net, qui est un programme transnational de R & D financée conjointement par des organisations nationales de financement dans le cadre de l'Action ERA-NET de WoodWisdom-Net.

## Références

- Korkut S., Akgül M., DüNDAR T. (2008) The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood, *Bioresource Technology*, 99, 1861-1868
- Noël, M., Fredon, E., Mougel, E., Masson, E., Masson, D., Delmotte, L.(2009). Lactic acid/wood-based composite material. Part 1: Synthesis and characterization. *Bioresource Technology*, 100, 4711-4716
- Mohareb A., Thévenon M.F., Wozniak E., Gérardin P., (2009), Effects of monoglycerides on leachability and efficacy of boron wood preservatives against decay and termites. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64, 135-138

A13

## Mesure dynamique de la puissance d'entraînement des broyeurs

LABBE Stéphane<sup>1</sup>, MEAUSOONE Pierre-Jean<sup>1</sup>, AUCHET Sébastien<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB),  
27 rue Philippe SÉGUIN, BP1041, 88051 Epinal Cedex 9, France  
[stephane.labbe@univ-lorraine.fr](mailto:stephane.labbe@univ-lorraine.fr), [pierre-jean.meausoone@univ-lorraine.fr](mailto:pierre-jean.meausoone@univ-lorraine.fr),  
[sebastien.auchet@univ-lorraine.fr](mailto:sebastien.auchet@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** broyage, déchiquetage, énergie, plaquette bois, puissance

### Résumé

De nos jours, les plaquettes forestières sont utilisées dans beaucoup de domaines et particulièrement sous forme de bois énergie. Ces plaquettes sont caractérisées par leur granulométrie, leur humidité et leur taux de cendres. Elles sont produites lors du broyage ou déchiquetage du bois par des machines munies de couteaux. Ces machines restent cependant très énergivores, même si les performances énergétiques des broyeurs sont encore difficiles à quantifier. Actuellement, le manque de données sur la puissance consommée par les broyeurs implique un surdimensionnement des moteurs et à une consommation d'énergie plus importante.

Pour ce projet de recherche, la force de coupe et l'énergie globale consommée lors du broyage sont les deux paramètres physiques utilisés pour quantifier les performances des broyeurs. La mesure de la force de coupe permet aussi bien de contrôler l'usure des couteaux qui a pour effet d'augmenter l'énergie consommée et de comprendre la fragmentation des plaquettes. Les forces de coupe sont mesurées proches de la coupe afin de minimiser la perte d'énergie à mesurer et d'améliorer la qualité du signal. Actuellement, soit un dynamomètre est placé entre le disque et la pointe du couteau pour mesurer directement les efforts de coupe dans le couteau, soit un extensomètre est placé au niveau du contre couteau afin de mesurer la déformation du contre couteau, convertie en force résultante de coupe par la détermination de la sensibilité dynamique du système.

Mesurer l'énergie globale consommée lors du broyage permet également d'estimer les coûts de broyage. La mesure de la consommation en carburant du moteur thermique alimentant le broyeur est l'une des solutions utilisées car elle est facile à mettre en œuvre. Plus récemment, une nouvelle méthode basée à la fois sur la mesure du couple d'entraînement du broyeur ainsi et de la vitesse de rotation de l'arbre au niveau de la prise de force d'un tracteur. L'influence de ce couplemètre sur le comportement dynamique entre la prise de force du tracteur l'arbre du broyeur est difficile à estimer et par conséquent à compenser.

Dans notre étude, la transmission par cardan entre la prise de force du tracteur et l'arbre du broyeur est instrumentée à l'aide de jauges de déformation afin de déterminer le couple transmis au broyeur par ce cardan. La vitesse de rotation instantanée est obtenue par l'analyse d'un signal rectangle fourni par le signal d'un capteur capacitif placée devant une roue dentée. Les essais dynamiques nous donnent les données nécessaires pour définir l'énergie consommée par le broyeur. Cette méthode est plus précise que la mesure de la consommation en carburant et permet de déterminer les performances énergétiques des broyeurs.

A14

## Le bois de flexion du peuplier : une étude de biomécanique intégrative

ROIGNANT Jeanne<sup>12</sup>, BADEL Eric<sup>21</sup>, LEBLANC-FOURNIER Nathalie<sup>12</sup>,  
MOULIA Bruno<sup>21</sup>, DECOURTEIX Mélanie<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Clermont Université-Université Blaise-Pascal, UMR 547 PIAF, 8 avenue Blaise Pascal,  
63178 Aubière cedex, France

<sup>2</sup>INRA, UMR 547 PIAF, 5, chemin de Beaulieu, 63039 Clermont-Ferrand cedex 2, France

[Jeanne.roignant@clermont.inra.fr](mailto:Jeanne.roignant@clermont.inra.fr)

**Mots clefs :** Cambium, Différenciation cellulaire, Fibres, Gène candidat, Sollicitations mécaniques, Vaisseaux, Vent

### Résumé

L'une des principales sollicitations environnementales auxquelles les arbres sont confrontés sont les flexions répétées de la tige/du tronc générées par le vent. Alors que les tempêtes représentent un risque majeur pour la stabilité mécanique des arbres, les recherches des dernières décennies ont montré que les sollicitations récurrentes par les vents courants pourraient constituer un facteur d'acclimatation à des événements extrêmes. Les modèles de changements climatiques globaux prévoient une augmentation de la fréquence des tempêtes sévères en Europe occidentale, tandis que la vitesse des vents courants diminuerait en période de végétation. Dans ce contexte, il apparaît alors pertinent de mieux comprendre comment les arbres seront ou non capables de s'acclimater leurs structures.

Des résultats récents ont montré que cela implique leur capacité à percevoir les sollicitations mécaniques auxquelles ils sont soumis quotidiennement, puis à ajuster leur croissance et la différenciation de leurs cellules, avec la production d'un bois appelé « bois de flexion ». Ce bois, présentant des ressemblances avec le bois de tension à fibres G, reste pour l'heure peu caractérisé. Pour mieux contrôler la production et la qualité du bois dans ce contexte de changements climatiques, il est nécessaire d'acquérir une meilleure compréhension de l'effet des sollicitations mécaniques sur l'activité du cambium (production) et sur la différenciation du bois.

Ici, nous présentons une analyse des conséquences morphologiques et anatomiques des flexions répétées sur de jeunes tiges de peuplier avec une prise en compte inédite de la répartition spatiale inégale des variables physiques sur la section transversale de la tige.

Les observations menées à l'échelle anatomique confirment que l'activité du cambium est stimulée par les flexions. La croissance secondaire est proportionnelle à l'intensité des déformations locales mais ne dépend pas du type de contrainte appliqué (tension ou compression des tissus). En revanche, la différenciation du bois semble être modulée différemment selon les contraintes mécaniques (tension ou compression). On ne peut alors sans doute plus parler "du" mais "des" bois de flexion. Les acteurs moléculaires impliqués dans ces réponses, parmi lesquels un gène codant pour un peptide de type CLE (Clavata), sont à l'étude.

A16

## Effect of wood flour treatment on the properties of wood-polymer composites

ASKANIAN Haroutioun<sup>1,2</sup>, FENG Ya<sup>1</sup>, COMMEREUC Sophie<sup>1,2</sup>, ANDANSON Jean-Michel<sup>1</sup>, COSTA GOMES Margarida<sup>1,2</sup>, VERNEY Vincent<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Clermont Université, UBP ICCF UMR CNRS 6296, BP 80026, 63171 Aubière, France

<sup>2</sup>Clermont Université, ENSCCF, Campus des Cézeaux, BP 187, 63170 Aubière, France

[Haroutioun.askanian@ensccf.fr](mailto:Haroutioun.askanian@ensccf.fr)

**Keywords:** Ionic liquid, wood flour, wood polymer composites

### Abstract

Wood flour is a renewable lignocellulosic material that has environmental and economical advantages when used as fillers in polymers. However, natural fibers have hydrophilic characters and often combine with a hydrophobic matrix such as polypropylene, which limits the performance of the composites produced. This research was devoted to the study of composites based on polypropylene (PP) and untreated/heat-treated maritime pine wood flour with 40 m % wood content. The thermal treatment process [Guyonnet et al. 1988] leads to chemical modification of wood, mainly onto hemicelluloses fraction which result in higher hydrophoby [Bourgois et al. 1988] and better thermal stability [Duchez et al.1998]. The main objective was to investigate the effect of the treatment and the particle size of the wood on the properties of the composites. Tensile strength, as well as crystallization and melting behavior, viscoelastic behavior, and water absorption served as indicator properties. All composites were prepared by using HAAKE MiniLab twin-screw micro compounder.

In order to reduce the average size and the size distribution of wood particles, a rotor mill from FRITTSCH with a sieve of 80 micrometers was used. Better properties obtained with all the composites based on treated wood flour compared to neat PP and untreated wood flour composites. In addition the milled wood flour enhance the properties of wood-polymer composites (WPCs) by showing a better dispersion, highest tensile modulus and increasing the crystallization rate of PP.

Another way to reduce the particle size was the dissolution and regeneration of wood flour by a green process, using an ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([bmim][Cl]). The dissolution was achieved by heating the samples in an oil bath. Three samples of Wood-[bmim][Cl] were prepared with 5 m % wood content, then each simple is maintained at three different temperatures : 130, 150 and 170°C.

The dissolution procedure of the samples was monitored using an optical microscopy Leica DM2500M with 10× magnification. Figure 1 illustrates the kinetics of the dissolution obtained with the three temperatures. After precipitation and filtration of the wood flour, the particles size was around 10 times smaller than the size obtained with the rotor mill.

The dissolution-regeneration process with ionic liquids is a powerful way to improve the interfacial bonding between the wood filler and the PP matrix.

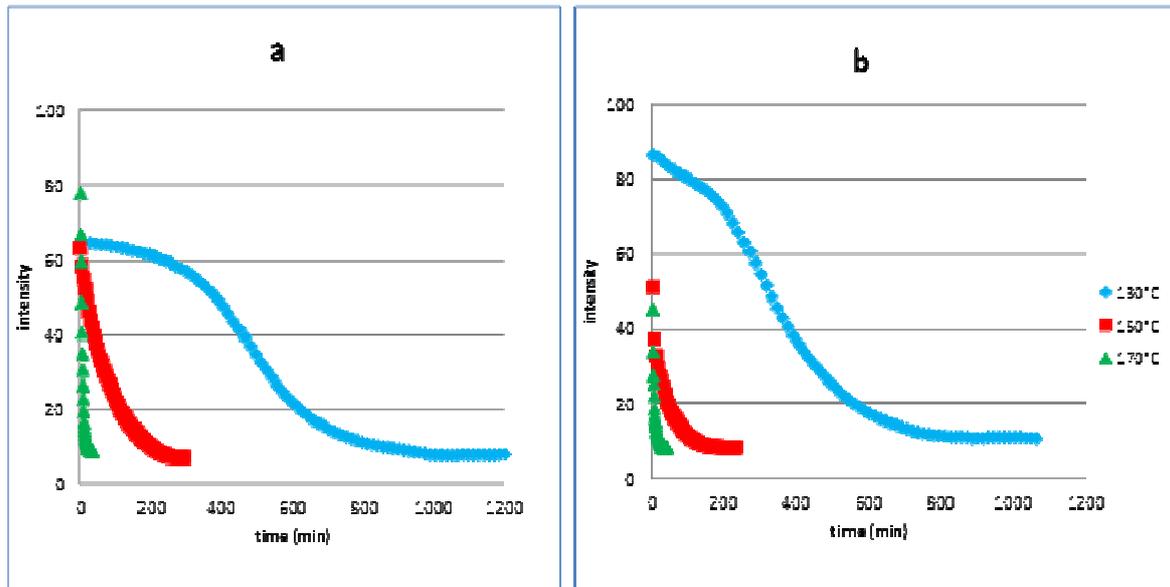


Fig. 1 : Dissolution rate of untreated wood flour (a) and treated wood flour (b) with a three different temperatures (◆) 130°C, (■) 150°C, (▲) 170°C

### Références

Bourgeois J, Guyonnet R. Characterization and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology*. 1988;22(2):143-55.

Duchez L, Guyonnet R. Optimization of wood retification by fractional factorial design. *Analisis*. 1998;26(8):39-43.

Guyonnet R., Bourgeois J. Procédé de fabrication d'un matériau ligno-cellulosique par traitement thermique et matériau obtenu par ce procédé. FR Patent 2 604 942 (A1), 1988.

## Comportement d'un contre-plaqué de bouleau en conditions sévères

CAETANO Lydie<sup>1</sup>, GALPIN Bertrand<sup>2</sup>, GROLLEAU Vincent<sup>1</sup>, CAPDEVILLE Jean-Damien<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F-56100 Lorient, France

<sup>2</sup> Ecoles Militaires de Saint- Cyr Coëtquidan, LMM, F-56381 Guer, France

<sup>3</sup> GTT, Gaztransport et Technigaz, F-78470 Saint Rémy-Lès-Chevreuses, France  
[lydie.caetano@univ-ubs.fr](mailto:lydie.caetano@univ-ubs.fr)

**Mots clés :** contre-plaqué, bouleau, LNG, impact, dynamique, humidité, cryogénie

### Introduction

Avec la crise écologique que le monde traverse, le transport maritime de gaz naturel sous forme liquide est en forte croissance. Le gaz, ici du méthane, est transporté par bateau dans des cuves qui doivent garantir isolation et sécurité pendant 40 ans. Le gaz est maintenu liquide par abaissement de température à pression atmosphérique. Ces cuves sont conçues de manière à contenir et maintenir la température cryogénique de  $-163^{\circ}\text{C}$  du méthane liquide.

Ce complexe isolant est composé d'une membrane en acier inoxydable 304L de 1,2mm en contact avec le méthane, d'un contre-plaqué (CP) de bouleau de 12 mm (9 plis), d'une mousse isolante de PolyUrethane renforcée de fibres de verre puis d'un autre CP, collé à la coque du bateau.

### Essais d'impact

Durant l'utilisation de ces cuves (remplissage, maintenance, navigation), toute perforation de la membrane est à proscrire, ce qui motive l'étude de l'impact cryogénique du complexe pour des vitesses d'impact de l'ordre de 30m/s à la température  $-163^{\circ}\text{C}$ .

Pour évaluer la résistance à la perforation sous impact, une série d'essais réalisés à la catapulte (2000J) a été réalisée, présentés Fig. 1. Les résultats de ces essais montrent que le CP de 12 mm situé sous la couche d'inox participe fortement à l'arrêt du projectile (pour la vitesse critique de perforation), en absorbant environ 40% de l'énergie cinétique initiale du projectile.

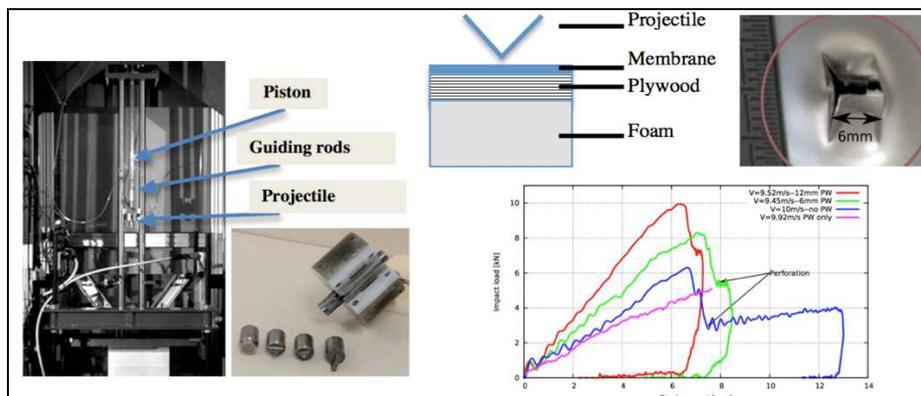


Fig. 1. Catapulte pneumatique (à gauche) et le projectile instrumenté avec ses embouts interchangeables, utilisés lors des essais. A droite, évolution de l'effort de contact en fonction du déplacement de l'impacteur lors d'un impact avec embout en dièdre sur le complexe membrane + CP + mousse, pour différentes épaisseurs du CP et sans CP.

## Influence des paramètres

Dans un deuxième temps, l'influence de nombreux paramètres influents sur le comportement mécanique du bois a été étudiée. Il est bien connu que le bois et ses dérivés comme le CP sont sensible à l'humidité [Siim (2012)], mais aussi à la température [Boller (1953)], ainsi qu'à la vitesse de déformation qu'il subit [Reid (1997)]. Mais au delà des effets de ces paramètres étudiés séparément, il est apparu une grande interaction entre eux dans nos essais, déjà citée dans la littérature [Gerhards (1982), Widehammar (2004)].

Par contre, l'étude de ces interactions en condition cryogénique et à haute vitesse de déformation ne semble encore jamais avoir été étudiée.

Notre travail se concentre sur l'étude de ces interactions lors d'une compression hors-plan, i.e. dans l'épaisseur, afin de développer un modèle numérique prédictif du comportement d'un complexe inox/contre-plaqué au cours d'un impact en cryogénie.

## Résultats

Les premiers résultats montrent des interactions fortes entre le taux d'humidité, la température et la vitesse de déformation. La Fig. 2 présente l'évolution de la contrainte nominale de compression (adimensionnalisée pour raison de confidentialité) en fonction de la déformation nominale pour des essais réalisés à différents taux d'humidité, en condition quasi-statique ambiante et à grande vitesse de déformation en condition cryogénique. L'effet classique adoucissant de la teneur en humidité croissante se trouve ici inversé en condition cryogénique.

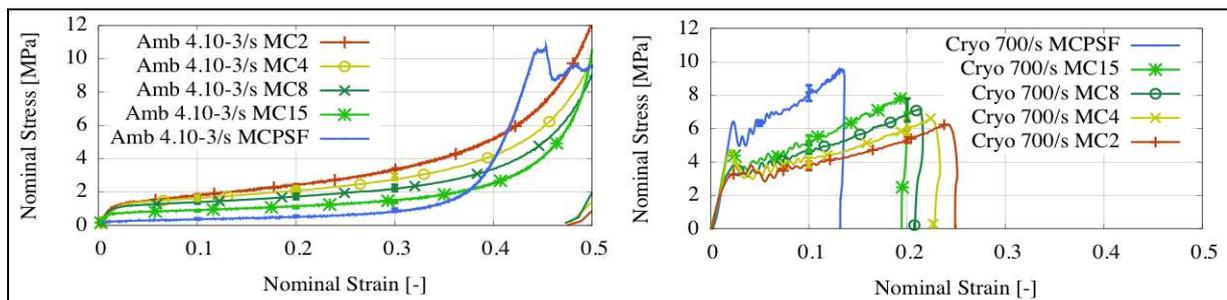


Fig. 2. Contrainte nominale (contrainte ingénieur) en fonction de la déformation nominale pour des échantillons de CP de 12 mm à une vitesse de déformation de 4e-3s-1 et température ambiante et à une vitesse de déformation de 700s-1 et température cryogénique pour différentes humidités dans le CP.

## Références

Boller K. H, Boller K. H. (1953) Strength of wood at low temperatures, Low temperature test methods and standards for containers, Committee on packing, packaging and preservation

Gerhards C. C., Gerhards C. C. (1982) Effects of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects, W&F, 14:4-36

Reid S. R. and Peng C., Reid S. R. and Peng C. (1997), Dynamic uniaxial crushing of wood, IJIE, 19:531-570

Siim K., Kask R., Lille H. and Täkker E., Siim K., Kask R., Lille H. and Täkker E., (2004), 8th International DAAAM Baltic Conference, Study of physical and mechanical properties of birch plywood depending on moisture content, Ind. Eng.

Widehammar S., Widehammar S. (2004), Stress-Strain Relationships for Spruce Wood: Influence of Strain Rate, Moisture Content and Loading Direction, SEM, 44:44-48

A18

## Impact d'un stockage à long terme en condition d'anaérobiose sur les propriétés physiques et mécaniques de l'Épicéa

RIGUELLE Simon<sup>1,2</sup>, LESIRE Cécile<sup>1</sup>, HEBERT Jacques<sup>1</sup>, JOUREZ Benoit<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, Gembloux, Belgique

<sup>2</sup> Laboratoire de Technologie du Bois, Service public de Wallonie, Gembloux, Belgique  
[simon.riguelle@spw.wallonie.be](mailto:simon.riguelle@spw.wallonie.be)

**Mots clés :** Anaérobiose, chablis, épicéa, propriétés, stockage

### Objectifs

Alternative au stockage du bois par aspersion ou immersion, la méthode de stockage sous bâches hermétiques se popularise depuis une quinzaine d'années principalement en France et en Allemagne suite aux tempêtes de 1999, 2007 et 2009. Ce procédé, encore méconnu des professionnels, permet de protéger le bois ensilé des dégradations causées par les agents biologiques (insectes et champignons) en garantissant tout au long du processus un taux d'oxygène proche de zéro dans le silo. Il vise également à maintenir leur état de fraîcheur tout au long de la durée de stockage, qui peut s'étendre sur plusieurs années, et ainsi conserver intactes les propriétés des bois.

Dans ce contexte, un dispositif expérimental de stockage sous bâches hermétiques de grumes d'épicéa a été installé en 2008 à Eupen (Belgique) en collaboration avec la firme allemande Wood-Packer et suivi durant cinq années. Ce dispositif a permis de mener une étude comparative des propriétés physiques et mécaniques des bois stockés en conditions réelles. Cette recherche s'inscrit en outre dans un projet régional d'élaboration d'un plan de crise chablis.

### Matériel et méthode

Un lot de 75 m<sup>3</sup> de grumes d'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst) fraîchement abattues a été ensilé sous une double couche de bâches en polyéthylène rendues hermétiques par soudure thermique (méthode Wood-Packer). Le taux d'oxygène a été suivi régulièrement afin de s'assurer de l'étanchéité du silo. En 2008, avant ensilage, des billons ont été prélevés dans la bille de pied de cinq grumes sélectionnées aléatoirement afin de constituer un lot témoin. Après sciage en plateaux, ils ont été séchés naturellement et stockés sous abri. En 2013, à l'ouverture du silo, cinq nouveaux billons ont été prélevés sur les mêmes grumes, dans le prolongement du premier.

Les essais ont visé à comparer d'une part les propriétés mécaniques sur des éprouvettes sans défaut ainsi que sur des bastaings aux dimensions d'emploi. D'autre part, les essais physiques ont porté sur la détermination de l'imprégnabilité ainsi que sur la perception de la modification éventuelle de la couleur des bois suite au stockage. Les billons témoins et stockés sous bâches hermétiques, ont suivi un schéma de découpe identique. La proximité des échantillons destinés aux tests mécaniques est privilégiée afin d'atténuer les variations dues à la hauteur dans la grume. Le tableau 1 dresse la liste des propriétés étudiées ainsi que les normes ayant servi à leur détermination.

Tab. 1 : Aperçu des tests effectués en laboratoire et des normes de référence

Tests	Echantillons		Normes de référence
	Dimensions (mm <sup>3</sup> )	Nombre	
<b>Module d'élasticité en flexion statique (MOE)</b>			
Eprouvettes sans défaut	360 x 20 x 20	24	NF B51-016
Bastaings	2200 x 38 x 100	24	NBN EN 408
<b>Contrainte de rupture en flexion statique (MOR)</b>			
Eprouvettes sans défaut	360 x 20 x 20	24	NF B51-008
Bastaings	2200 x 38 x 100	24	NBN EN 408
<b>Contrainte de rupture en flexion dynamique (K)</b>			
Eprouvettes sans défaut	300 x 20 x 20	24	NBN 225
<b>Imprégnabilité</b>	750 x 40 x 40	15	CEN/TR 14734
<b>Couleur (bruts de sciage et rabotés)</b>			
Eprouvettes sur dosse	400 x 85 x 20	15	NBN EN ISO 4120
Eprouvettes sur faux-quartier		20	

### Résultats et discussion

Le taux d'oxygène au sein du silo est resté inférieur à 2% tout au long du stockage, ce qui constitue un indicateur fiable du bon fonctionnement de la technique. A l'ouverture du silo, les grumes présentaient un aspect comparable à du bois fraîchement abattu, l'écorce restant adhérente. Cependant, un mycélium blanchâtre superficiel identifié comme étant du *Gliocladium solani* a été observé sur l'écorce des surfaces exposées de la pile. Celui-ci n'affecte toutefois pas le bois en profondeur.

Les analyses réalisées sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes sans défaut et des bastaings ne montrent aucun effet significatif du stockage anaérobie sur les modules d'élasticité et de rupture en flexion statique ainsi que sur la résilience des bois étudiés. De même, la faible imprégnabilité de l'épicéa n'est pas améliorée lors du stockage en condition d'anaérobiose contrairement à l'augmentation constatée suite au stockage par aspersion. Le test de couleur réalisé n'a pas permis d'identifier de différence perceptible par un panel d'observateurs que ce soit sur les éprouvettes sur dosse ou sur faux-quartier et ce, tant sur les faces brutes de sciage que sur les faces rabotées.

Il ressort de cette expérience que la méthode de conservation sous bâches hermétiques, pour autant qu'elle soit conduite rigoureusement, peut être envisagée comme une alternative au stockage par aspersion pour des lots de bois chablis d'épicéa de haute qualité et de forte valeur marchande sans risque de réduction du potentiel de valorisation.

L'absence d'impacts environnementaux est un autre atout non-négligeable du procédé. Cependant, le coût reste le principal frein à l'utilisation du stockage sous bâches hermétiques à grande échelle en complément du stockage par aspersion. En effet, son coût ne devient concurrentiel avec l'aspersion que pour des durées de stockage supérieures à 3 ans.

A19

## Variation radiale de l'angle des microfibrilles de cellulose et de la longueur des trachéides chez le Douglas

VAIANOPOULOS Céline<sup>1</sup>, HEBERT Jacques<sup>2</sup>, JOUREZ Benoit<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Technologie du Bois, Service public de Wallonie, Gembloux, Belgique

<sup>2</sup> Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, Gembloux, Belgique

[celine.vaianopoulos@spw.wallonie.be](mailto:celine.vaianopoulos@spw.wallonie.be)

**Mots clefs :** Angle des microfibrilles de cellulose, Douglas, largeur de cerne, longueur des trachéides

### Objectifs

Le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) connaît depuis quelques décennies un essor important en Wallonie, du fait entre autre de son potentiel de croissance supérieur à celui de l'Epicéa. Néanmoins, la sylviculture appliquée à cette essence est généralement calquée sur celle de l'Epicéa, ce qui ne permet pas nécessairement de profiter pleinement du potentiel de l'espèce. Aussi, pour guider l'action des sylviculteurs, une étude visant à évaluer l'impact de la vitesse de croissance sur les propriétés du bois de Douglas a été initiée.

Il est admis aujourd'hui que l'angle des microfibrilles de cellulose (AMF) de la paroi des trachéides, ainsi que la longueur des trachéides, en complément de caractéristiques telles que la masse volumique, la largeur des cernes ou la texture, pourraient permettre d'expliquer plus finement le comportement mécanique du bois sans défaut. Afin de tenter de le démontrer, dans un premier temps, l'étude a porté sur les variations de l'AMF et de la longueur des trachéides au sein des arbres en fonction de différents paramètres : la largeur des cernes, l'âge du cerne, la position radiale et la hauteur dans l'arbre. Par la suite, ces résultats seront utilisés pour identifier les relations entre les propriétés mécaniques du bois et ses caractéristiques anatomiques. L'objectif final est de relier les caractéristiques de croissance avec les propriétés du bois produit et d'en déduire des recommandations sylvicoles.

### Matériel et méthodes

Onze peuplements âgés de 41 à 69 ans, de circonférence moyenne de 150 cm à 1,5 m et présentant des accroissements moyens en circonférence répartis entre de 2,2 à 3,8 cm/an ont été sélectionnés en Région wallonne. Au sein de chacun d'eux, six arbres de circonférences réparties entre 120 et 180 cm ont été prélevés. Pour chaque arbre, trois rondelles ont été découpées à 2, 6 et 10 m. A ce stade, les mesures anatomiques à 2 m des arbres de classe de circonférences 150-159 cm des onze peuplements ont été étudiées et actuellement, les arbres des classes de circonférences 130-139 et 170-179 cm de deux peuplements à croissance lente et deux à croissance rapide sont en cours d'analyse.

Afin de mesurer l'AMF, des coupes anatomiques radiales ont été réalisées et séchées à l'air ambiant pour induire des microfissures parallèles aux microfibrilles de cellulose dans la paroi des trachéides. La mise en évidence des fissurations a été obtenue par un traitement des coupes avec une solution iodo-iodurée et de l'acide nitrique à 35 %. Ensuite, les coupes ont été photographiées sous microscope et l'AMF a été mesuré au moyen d'un analyseur d'images.

La mesure de la longueur des trachéides a été réalisée au moyen d'un projecteur de profil de type Visopan de Reichert sur des macérations obtenues par un traitement à la triéthanolamine.

## Résultats et discussion

A ce stade, seuls les résultats obtenus sur les 11 arbres dont la circonférence est comprise entre 150 et 159 cm sont présentés. Les données obtenues ont permis de dresser une série de constats.

L'AMF décroît de la moelle vers l'écorce avec l'âge du cerne (Fig. 1). Cette décroissance est nettement plus importante dans les premières années et se stabilise progressivement au-delà d'une dizaine d'années. Par ailleurs, l'évolution de la longueur des trachéides montre un profil inversé, avec pour certains arbres une stabilisation approximativement au même âge.

Au niveau intra-cerne, l'AMF dans le bois initial se caractérise généralement par des valeurs plus importantes que dans le bois final. En règle générale, l'AMF dans le bois final suit un profil d'évolution radiale typique comme décrit plus haut alors que le profil dans le bois initial est plus variable, traduisant peut-être une plus forte sensibilité aux conditions de croissance (Fig. 2). Ces variations diffèrent également en fonction de l'arbre étudié.

La stabilisation des valeurs d'AMF et de longueur des trachéides se produit sensiblement aux mêmes âges traduisant le passage du bois juvénile au bois adulte. Toutefois, cette constatation n'est pas immuable puisque, pour certains individus, un déphasage a été observé entre ces deux paramètres.

Il semblerait qu'il existe une relation entre d'une part la largeur de cerne et d'autre part l'AMF ou la longueur des trachéides mais ces relations doivent être confirmées sur un plus grand nombre d'observations. Par ailleurs, une analyse complémentaire doit être menée afin de déterminer s'il existe réellement une relation entre l'AMF et la longueur des trachéides ou si leur évolution conjointe est simplement en liaison avec l'augmentation de l'âge du cambium.

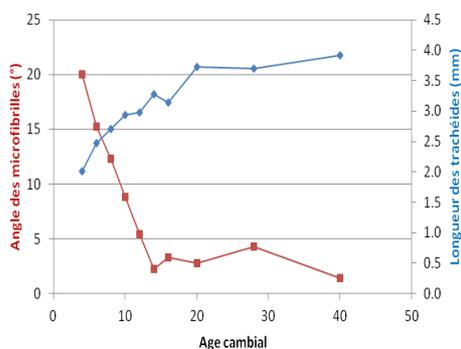


Fig. 1 : Profil type d'évolution de l'angle moyen des microfibrilles de cellulose (AMF, en degrés) et de la longueur moyenne des trachéides (en mm) en fonction de l'âge cambial pour une rondelle prélevée à 2 m sur un arbre de circonférence moyenne de 155 cm d'un peuplement à croissance rapide

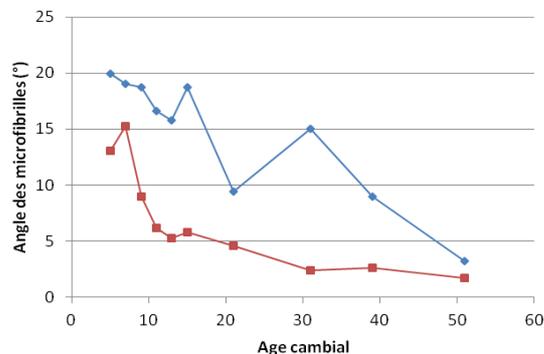


Fig. 2 : Exemple d'évolution de l'angle moyen des microfibrilles de cellulose (AMF, en degrés) dans le bois initial (BI) et dans le bois final (BF) en fonction de l'âge cambial pour une rondelle prélevée à 2 m sur un arbre de circonférence moyenne de 155 cm d'un peuplement à croissance lente

B01

## Elaboration d'un procédé de conservation du bois déroulé à l'état vert

LAVALETTE Anne<sup>1</sup>, CANILLAS Sabine<sup>1</sup>, DE BUSSAC Olivier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Panibois, 3 rue des Vignes, 45240 Marcilly en Villette, France  
[anne.lavalette@panibois.com](mailto:anne.lavalette@panibois.com)

**Mots clefs :** bois vert, déroulage, stockage, moisissures

### Introduction et objectifs

Le développement de produits à base de bois à l'état vert (*i.e.* avec une teneur en eau supérieure à 30%) a connu une croissance importante ces dernières années. Des technologies telles que le collage, l'aboutage et la fabrication de contreplaqués ont été étudiées [Lavalette 2013]. Elles permettent une amélioration du rendement matière et des économies d'énergie : au cours du procédé "bois vert", les chutes ou autres défauts ne sont pas séchés, contrairement aux procédés traditionnels. De plus, le bois vert a une meilleure aptitude au cintrage que le bois sec [Navi et al. 2005]. Parallèlement à ces développements, se posent des questions de stockage des bois à l'état vert. Les procédés usuels de conservation du bois sont le séchage, le stockage sous eau, ou l'imprégnation des bois par des produits de conservation [Freeman et al. 2005, Schmidt 2006]. La congélation ou le stockage dans une atmosphère privée d'oxygène (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) sont des moyens plus rarement utilisés. A l'heure actuelle, ces différentes méthodes ne permettent pas de répondre pleinement à la question du stockage des bois à l'état vert, que ce soit pour des raisons qualitatives, économiques ou environnementales [Loudiyi 2012].

Sur les bois déroulés à l'état vert, la prolifération des moisissures est extrêmement rapide et néfaste pour les produits. Plusieurs moisissures ont été identifiées, dont les espèces les plus courantes appartiennent aux genres suivants: Neurospora, Penicillium, Cladosporium, Ophiostoma. L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre un procédé de conservation adapté au déroulage de bois de tremble à l'état vert, pour certaines applications spécifiques telles que l'emballage alimentaire. Le procédé choisi devra conserver le côté naturel du bois.

La première étape du projet consiste à cibler les conditions environnementales dans lesquelles les moisissures se développent, dans le but de choisir un principe de conservation du bois adapté. La seconde partie de cette étude porte sur l'optimisation de la méthode de stockage choisie. L'influence de paramètres sur le développement des moisissures a été testée, à travers différentes campagnes expérimentales. Des essais seront réalisés en particulier sur la température, l'humidité relative de l'air, le conditionnement des bois, les temps de stockage.

### Procédé de conservation

Des feuilles de bois de tremble (*Populus Tremula*) déroulé de dimensions 0,315 x 0,216 m x 1,2 mm ont été utilisées pour cette étude. Elles sont empilées sur des palettes de 0,8 x 1,2 m<sup>2</sup>.



Fig. 1 : Palette contenant des piles de bois déroulé à l'état vert - 0,9 m de hauteur.

L'influence de la température sur la croissance des moisissures a été étudiée. Les moisissures se développent principalement entre 5°C et 40°C. Un stockage à basse température positive (entre 0°C et 5°C) a été testé. Cependant, si une température basse ralentit le développement des moisissures, elle ne le stoppe pas complètement. Les travaux se sont alors concentrés sur une conservation à température négative. Ainsi, pendant toute la durée du stockage, les moisissures et autres agents biologiques n'évoluent pas sur les bois. Au cours de ce process, les phases de congélation et de décongélation sont des étapes critiques pendant lesquelles nous avons noté des développements fongiques. La rapidité de la congélation est primordiale pour éviter le développement de moisissures avant le stockage et limiter les pertes hydriques. De bons résultats ont été obtenus lors de congélation des palettes de bois en chambres adaptées, à une température de -20°C. Les recherches se sont alors concentrées sur la décongélation, étape plus problématique au cours de laquelle des moisissures prolifèrent. La décongélation débute par l'extérieur des piles de bois. Lorsque le temps de décongélation du cœur des piles est trop long, les bois sèchent et moisissent sur l'extérieur des piles. Pour éviter cela, il est nécessaire d'obtenir une décongélation la plus homogène possible. Plusieurs essais réalisés dans ce but, avec différents paramètres tels que l'espace entre les piles (circulation d'air), l'importance de la ventilation, l'humidité relative de l'air, la température, ou l'ajout d'intercalaires métalliques à mi-hauteur des piles de feuilles. Les résultats des tests montrent que les espaces entre les piles et les intercalaires permettent d'accélérer la décongélation, tout comme un flux d'air important. Une humidité relative de l'air élevée permet de limiter l'assèchement des bois. Cependant, lors de la décongélation à température constante le tour des piles est dégelé avant le cœur et présente souvent des développements de moisissures.

### **Perspectives d'évolution**

Un cycle de température pendant la décongélation semble adapté pour répondre à cette problématique. Une température située autour de 2°C et une forte humidité relative de l'air en fin de cycle permettrait d'éviter l'assèchement du bois et l'apparition de moisissure sur le contour des feuilles. La température de départ est à définir. Plusieurs essais seront réalisés, avec des températures comprises entre 40°C et 60°C, toujours à forte humidité relative de l'air pour diminuer le temps de décongélation et détruire les moisissures. L'objectif final de cette étude est la décongélation des palettes 24h maximum, sans développement de moisissures et avec une répartition uniforme de la température du bois.

### **Remerciements**

Région Centre, Panibois, Museum National d'Histoire Naturelle – Laboratoire de mycologie.

### **Références**

Freeman M. H., Nicholas D. D., Schultz T. P. (2005) Non-Arsenical Wood Protection: Alternatives for CCA, Creosote, and Pentachlorophenol, Environmental impacts of treated wood. Pp 19-36 in Environmental Impacts of Treated Wood, Chapter 2. CRC Press.

Loudiyi L. (2012) Projet Coolwood - ANR-12-RMNP-0002 - [www.coolwood.fr](http://www.coolwood.fr).

Lavalette A. (2013) Développement de contreplaqués pour la construction navale : caractérisation multi-échelle et compréhension des phénomènes de collage du pin maritime à l'état vert. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France.

Navi P, Heger F. (2005) Comportement thermo-hydrromécanique du bois. Application technologiques et dans les structures. Presses Polytechniques et universitaires romandes.

Schmidt O. (2006) Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use, Springer Science & Business Media.

## B02

**Analyse des eaux de lessivage par MP-AES d'un bois traité par des associations tannin-bore**HU Jinbo<sup>1,2</sup>, TONDI Gianluca<sup>3</sup>, CANDELIER Kévin<sup>1</sup>, THEVENON Marie-France<sup>1</sup><sup>1</sup>Research Unit BIoWooEB, CIRAD, TA/B 114/16, 34398 Montpellier Cedex 5, France<sup>2</sup>College of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Shaoshan South Road, No. 498, Changsha, Hunan, 410004, China<sup>3</sup>Salzburg University of Applied Sciences, Forest Products Technology and Timber Constructions Dept., 136a Marktstraße, 5431-Kuchl, Austria[kevin.candelier@cirad.fr](mailto:kevin.candelier@cirad.fr)**Mots clefs :** Complexe Tannin-Bore,  $\epsilon$ -caprolactam, Lessivage, Préservation du bois, MP AES.**Contexte de l'Etude**

La plupart des essences de bois européennes ont une assez faible durabilité naturelle face aux agents de dégradations biotiques et abiotiques. L'utilisation de nouveaux produits et/ou de nouvelles méthodes de préservation (chimique, thermique...) du matériau bois sont nécessaires pour que ce dernier puisse être utilisé en milieu extérieur, tout en ayant un cycle de vie prolongé. De nombreux travaux ont montré le bon potentiel d'utilisation du Bore, sous forme d'acide borique, en tant que matière active face aux attaques fongiques mais aussi vis-à-vis de certains insectes (Drysdale, 1994; Thevenon *et al.*, 1997). Son utilisation à l'échelle industrielle est freinée par son caractère lessivable et son faible degré de fixation au sein du matériau bois (Obanda *et al.*, 2008), ainsi que par des restrictions Européennes limitant son usage à des concentrations inférieures à 5.5% m/m. Utiliser de l'acide borique pour la protection du bois oblige donc désormais à mettre au point des formulations fixant efficacement de faibles quantités sur le très long terme. Des formulations associant tanins et acide borique ont montré une certaine efficacité dans la rétention du bore dans le bois traité (Thévenon *et al.*, 2010), laquelle reste à améliorer pour des lessivages très agressifs (Tondi *et al.*, 2013). L'objectif de cette étude est d'évaluer l'amélioration de cette formulation Tanin-Bore, par ajout de  $\epsilon$ -caprolactame, ce qui permettrait d'obtenir un polymère plus élastique, doté d'une meilleure résistance à la lixiviation et donc d'augmenter le degré de fixation du Bore dans le matériau. L'autre objectif est de mesurer la quantité de bore dans le bois, à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique à plasma micro-onde (MP-AES).

**Matériels et Méthodes**

Les trois formulations à base de tanin et d'acide borique, étudiées dans cette étude sont présentées dans le tableau 1.

Tab. 1 : Concentrations massiques des produits chimiques composants les différentes solutions de préservation étudiées.

Formulation	Tanin* (%)	Acid Borique (%)	Hexamine (%)	NaOH (%)	Caprolactam (%)	Eau (%)
Acide Borique pur	-	0.43	-	-	-	99.57
Tanin-Bore	19.46	0.97	1.16	0.97	-	77.44
Tanin- $\epsilon$ Caprolactame- Bore	8.14	0.41	0.49	0.41	15.56	75.01

\* Tanins de Mimosa (*Acacia mearnsii* anciennement *mollissima*, de Wildt) fournis par la société *Silva Chimica* (Cuneo, Italie).

Pour chacune de ces formulations, réalisées en phase aqueuse, les pHs ont été ajusté à 9, par ajout successif de solution de NaOH de concentration 33% (m/m).

Des blocs de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de dimensions 50x25x15 mm<sup>3</sup> ont été imprégnés de ces solutions, par immersion, sous un cycle vide-pression (30 min – 8 bars) suivi d'un trempage à pression atmosphérique (24h). Après détermination des taux de rétention des différents produits, les éprouvettes ont été soumises à un lessivage suivant les directives de la norme ENV 1250-2 (1995). Chacune de ces eaux de lessivage a ensuite été analysée à l'aide d'un spectromètre d'émission à plasma micro-ondes, MP-AES 4100 Agilent (Figure 1), afin de déterminer les taux de Bore lessivés en fonction des différentes formulations chimiques. Les résultats sont présentés sur la Figure 2.

## Résultats

La figure 2 montre que la présence de Tanin augmente significativement la fixation du Bore dans le bois. La formulation contenant de l'  $\epsilon$ -caprolactame permet de fixer le Bore de manière plus conséquente et ce pour des temps de lessivage importants. Ces résultats montrent que la formulation à base de Tanin-Bore- $\epsilon$ -caprolactame est susceptible de fournir une protection durable contre la dégradation du bois, en milieu extérieur.



Fig. 1 : Spectromètre d'émission à Plasma micro-ondes MP-AES 4100 AGILENT, CIRAD, UR114 BiowooEB.

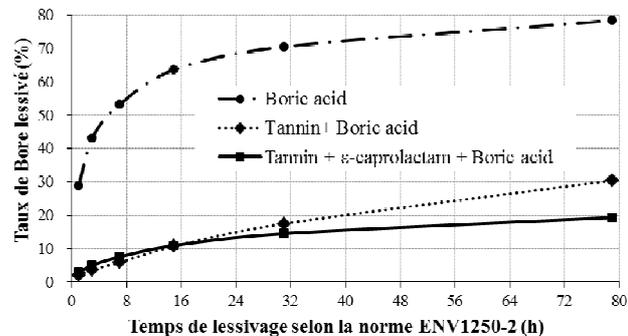


Fig. 2 : Taux de Bore lessivés sur le Pin sylvestre préalablement imprégné avec les différentes formulations.

Le MP-AES 4100 Agilent permet une analyse multi-élémentaire directe, précise et peu coûteuse. Les résultats issus de ces analyses permettent donc d'évaluer rapidement la résistance des produits de préservation du bois face au lessivage.

## Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce au financement ANR-10-EQPX-16-Xyloforest.

## Références

- Drysdale J.A. (1994) Boron treatments for the preservation of wood: A review of efficacy data for fungi and termites. The International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP 94-30037. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden.
- Obanda D. N., Shupe T. F., Barnes H. M. (2008) Reducing leaching of boron-based wood preservatives—A review of research. *Bioresource technology*, 99(15), 7312-7322.
- Thevenon M. F., Pizzi A., Haluk J. P. (1997) Non-toxic albumin and soja protein borates as ground-contact wood preservatives. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 55(5), 293-296.
- Thévenon M.F., Tondi G. and Pizzi A. (2010) Environmentally friendly wood preservative system based on polymerized tannin resin-boric acid for outdoor applications. *Maderas Ciencia Y tecnologia*, 12(3), 253-257.
- Tondi G., Thevenon M. F., Mies B., Standfest G., Petutschnigg A., Wieland S. (2013) Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity and wood anatomy in wood infiltration. *Wood Science and Technology*, 47(3):615-626.

## Conductivité thermique de bois tropicaux

GERARD Jean<sup>1</sup>, GUIBAL Daniel<sup>1</sup>, LOTTE Sylvain<sup>1</sup>, LANGBOUR Patrick<sup>1</sup>

<sup>1</sup> U.R. *Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits* (BioWooEB) - Cirad, Montpellier, France  
[jean.gerard@cirad.fr](mailto:jean.gerard@cirad.fr)

**Mots clefs :** conductivité thermique, bois tropicaux, méthode du disque chaud

### Résumé

La conductivité thermique  $\lambda$  (en watts par mètre par kelvin,  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) d'un matériau caractérise son aptitude à conduire la chaleur. Cette grandeur est d'autant plus faible que le matériau est isolant. Elle dépend essentiellement de la nature du matériau et de la température, mais aussi de son taux d'humidité.

Les données disponibles sur la conductivité thermique des bois tempérés ou tropicaux sont très parcellaires et incomplètes alors que cette caractéristique est de plus en plus demandée par les opérateurs de la filière-bois, notamment ceux spécialisés dans les revêtements de sols techniques (planchers et parquets de différents types).

Une campagne d'essais a donc été conduite sur un échantillonnage de bois tropicaux et tempérés correspondant à une large gamme de densités afin de répondre à la demande de ces opérateurs. La base de données constituée servira à alimenter la prochaine version du logiciel *Tropix* ainsi que l'*Atlas des bois tropicaux* en cours d'élaboration.

Les mesures ont été réalisées dans le laboratoire de thermo-physique du Groupe d'Etudes des Matériaux Hétérogènes (GEMH, Centre Européen de la Céramique, Limoges).

La méthode du disque chaud a été utilisée. Elle est régie par la Norme Internationale ISO 22007-2 et basée sur l'utilisation d'une source plane transitoire. L'adaptation pratique de cette méthode est l'analyseur de conductivité thermique et diffusivité thermique *Hot Disk*. La sonde de l'analyseur *Hot Disk* se compose d'un motif conducteur électrique qui se présente sous la forme d'une double spirale en nickel sérigraphiée sur une feuille mince d'un matériau isolant (Kapton).

Pour effectuer une mesure de conductivité thermique, la sonde doit être placée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Le principe de base du système est de fournir au matériau une puissance constante pendant un temps défini via la sonde du *Hot Disk* afin de générer une augmentation de température de un à plusieurs degrés. La sonde mesure également l'élévation de température.

Les échantillons de bois utilisés pour les mesures sont des planchettes de dimension standard Cirad (13 x 6 x 1 cm) dont le format est bien adapté au dispositif de mesure. En particulier, avec le paramétrage du dispositif choisi, l'épaisseur de 10 mm permet de considérer le milieu comme semi-infini, le front de chaleur ne sortant pas du matériau du côté opposé au disque chaud.

Lors de deux campagnes d'essais successives, 370 couples de planchettes correspondant à 43 essences différentes ont été testés. Les couples de planchettes ont été appariés ou non en fonction de leur densité et de leur orientation dosse - quartier.

Les essences testées sont principalement des feuillus tropicaux, ainsi que quelques feuillus et résineux tempérés.

Les densités des planchettes ont été déterminées à l'issue de la mesure.

La figure 1 présente les conductivités thermiques mesurées en fonction des densités moyennes des couples de planchettes testés.

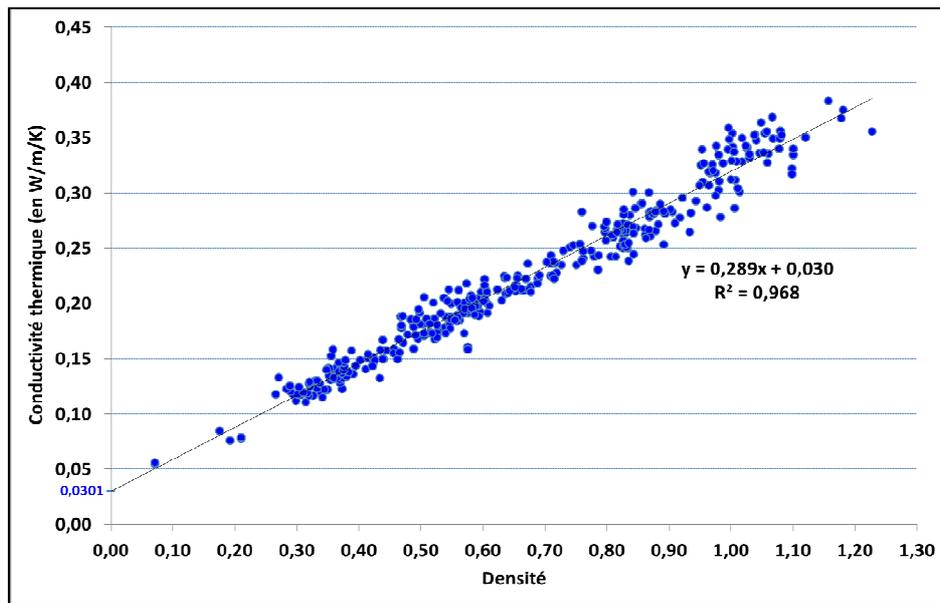


Fig.1 : conductivité thermique = f (densité) pour 370 couples de planchettes (43 essences tropicales et tempérées)

L'ordonnée à l'origine de la droite de régression (0,030) correspond à la conductivité thermique d'un bois « théorique » de densité nulle, c'est-à-dire de l'air. Dans la littérature, la conductivité thermique de l'air est donnée comprise entre 0,025 et 0,026  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  à 20°C ce qui confirme la qualité de la régression.

## Références

- Gustafsson S.E., (1990). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Rev. Sci. Instrum.* 62, 797 (1991).
- Napoli A., Perré P., Ladevie B., Kouchade C.A., Monnier C., (2002). Caractérisation des propriétés de transfert dans le bois : méthodes rapides pour la détermination en routine de la diffusivité massique et de la conductivité thermique. Rapport final du contrat ADEME n°00 01 068, Cirad/Emac/Lermab/Ctba/Uffep, 62 pages.
- Niemz P., (2007). Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit ausgewählter einheimischer und fremdländischer Holzarten. *Bauphysik* 29 (2007), Heft 4, 311-312.
- Smith D.S., Alzina A., Bourret J., Nait-Ali B., Pennec F., Tessier-Doyen N., Otsu K., Matsubara H., Elser P., Gonzenbach Urs T, (2013). Thermal conductivity of porous materials. *J. Mater. Res.*, Vol. 28, No. 17, Sep 14, 2013.

## Point de saturation de fibres (PSF) de trois essences de bois d'Algérie

DERBAL Wassila<sup>1</sup>, ZERIZER Abdellatif<sup>1</sup>, GERARD Jean<sup>2</sup>, GUIBAL Daniel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> U.R. *Matériaux, Procédés, Environnement* - Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, Algérie

<sup>2</sup> U.R. *Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits (BioWooEB)* - Cirad, Montpellier, France  
[derbalwassila@hotmail.fr](mailto:derbalwassila@hotmail.fr)

**Mots clefs :** Pin d'Alep, Chêne Afarès, Chêne Zéen, Point de saturation des fibres, retrait de séchage

### Résumé

Une partie de l'eau contenue dans un bois vert remplit plus ou moins complètement les vides cellulaires et intercellulaires. L'évacuation de cette eau (appelée « eau libre ») s'effectue sans retrait du bois. Lorsque l'eau libre a entièrement disparu, le bois ne contient plus que de l'eau liée chimiquement aux parois des cellules, et dont le départ lors du séchage occasionne des phénomènes de retrait à l'origine de déformations du bois. Le Point de Saturation des Fibres (ou PSF) correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois subit des variations dimensionnelles dues aux variations d'humidité ambiante.

Le PSF est un très bon indicateur du comportement du bois durant le séchage et de sa stabilité dimensionnelle après mise en œuvre (ou réciproquement de sa nervosité), lors d'échanges d'humidité entre le matériau et le milieu ambiant.

Les trois essences étudiées, le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*), le Chêne Zéen (*Quercus canariensis*) et le Chêne Afarès (*Quercus afares*), sont parmi les plus abondantes en Algérie mais leur utilisation reste limitée, notamment pour les deux Chênes du fait de leur nervosité.

Le PSF de chacune des 3 essences a été déterminé sur 15 échantillons de 20 x 20 mm de section transversale et 10 mm de hauteur prélevés dans 2 billons provenant de 2 arbres.

Initialement saturés en eau dans un autoclave (méthode du vide et pression), ces échantillons ont été séchés et stabilisés en enceinte climatique successivement à des taux d'humidité voisins de 18%, 12% et 6% (soit respectivement 85% d'humidité relative de l'air et 30°C, 65% d'HR et 20°C, 30% d'HR et 20°C). Ils ont été ensuite stabilisés en étuve sèche jusqu'à l'état anhydre. Leurs dimensions transversales (plan RT) ont été mesurées sur les échantillons saturés et après chaque stabilisation. Ces dimensions ont été utilisées pour calculer les « variations surfaciques » entre l'état saturé et chacun des quatre états stabilisés.

Sur chacune des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques du plan RT] de la figure 1, le PSF de chaque échantillon est déterminé en extrapolant l'ordonnée à l'origine.

Les dimensions R et T prises à l'état saturées et à l'état anhydre ont également été utilisées pour calculer les retraits linéaires totaux.

Le tableau 1 présente les valeurs moyennes des retraits linéaires et du PSF obtenus pour les 3 essences étudiées.

Tab.1 : retraits linéaires et PSF des 3 essences algériennes étudiées

	Pin d'Alep	Chêne Afarès	Chêne Zéen
Retrait radial (%)	5,4	7,6	8,3
Retrait tangentiel (%)	7,1	10,9	15,2
PSF (%)	29,5	32,8	32,3

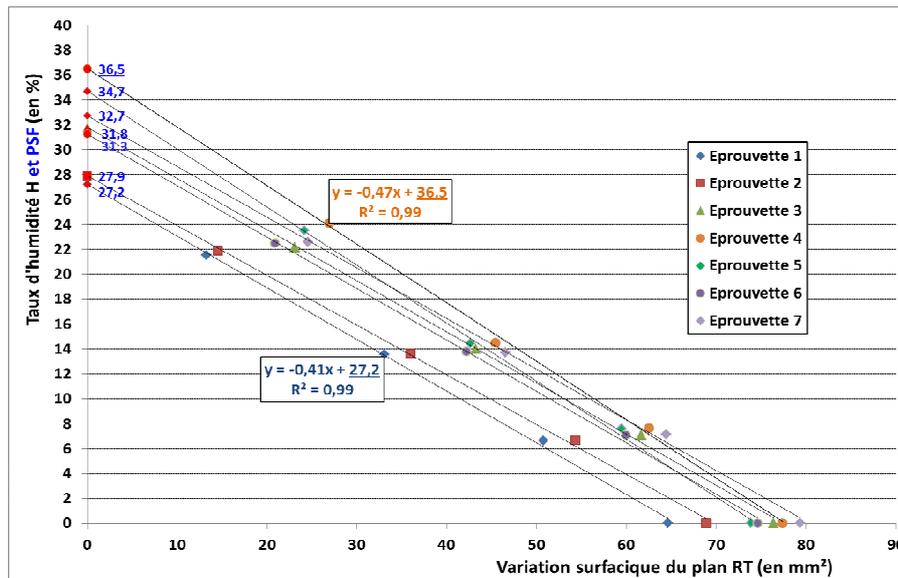


Fig.1 : Détermination du PSF du Chêne Zéen par calcul de l'ordonnée à l'origine des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques du plan RT]

L'utilisation du retrait surfacique pour déterminer le PSF permet de s'affranchir des différences de comportement du bois suivant la direction radiale et tangentielle : le PSF déterminé à partir de l'évolution du retrait radial entre l'état saturé et l'état anhydre apparaît toujours différent de celui déterminé à partir de l'évolution du retrait tangential.

## Références

- Almeida G., (2006). Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées. Thèse de doctorat, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, 232 Pages.
- Dumoncaud O., (2001). Petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter l'emploi des traitements par les pesticides : problèmes posés par l'utilisation du Châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) et intérêts d'un traitement de type friture à basse température.
- Hernández, R.E., Bizoñ M., (1994). Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber saturation point. *Wood and Fiber Science*, 26(3):360-369.
- Kelsey, K.E. (1956). The shrinkage intersection point – Its significance and the method of its determination. *Forest Products Journal*, 6:411-417.
- Siau, J.F. (1995). Wood: Influence of moisture on physical properties. Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, 227 pages.
- Skaar C. (1988). Wood-water relations. Springer-Verlag, New York. 283 pages.
- Thibaut A., (2004). Le point de saturation des fibres. *Guyan'Info Bois* n°10, Centre Technique des Bois de Guyane, Cirad, octobre 2004.

B05

## Étude des propriétés physiques et des paramètres de couleurs de *Pterocarpus erinaceus* Poir en zones soudanienne, guinéenne et sahélienne.

SEGLA Kossi Novinyo<sup>1</sup>, KOKUTSE Adzo Dzifa<sup>1</sup>, LANGBOUR Patrick<sup>2</sup>, GUIBAL Daniel<sup>2</sup>, CHAIX Gilles<sup>3</sup>, ADJONOU Kossi<sup>1</sup>, KOKOU Kouami<sup>1</sup>.

1-Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Faculté des Sciences,  
Université de Lomé, BP 1515, Lomé, Togo.

2-CIRAD, Département PERSYST, Urp BioWooEB 34398 Montpellier Cedex 5.

3- CIRAD, Umr AGAP, BP 5035, 34398 Montpellier Cedex 5, France

[kosiseгла@gmail.com](mailto:kosiseгла@gmail.com)

**Mots clés :** propriétés du bois ; *Pterocarpus erinaceus* ; spectroscopie proche infra rouge Togo ; zone climatique.

### Introduction

*Pterocarpus erinaceus* est actuellement l'espèce spontanée des zones guinéo-soudanienne et soudano-sahélienne très exploitée et menacée en Afrique de l'Ouest (Sylla et al., 2002 ; Ouedraogo et al., 2006). Elle est donc d'une importance socio-économique de par ces nombreuses utilisations, entraînant ainsi une forte pression sur les peuplements naturels. Toutefois, la sylviculture et les propriétés technologiques du bois sont mal connues et ne permettent pas actuellement d'intégrer l'espèce dans les programmes de reboisement dans la sous-région. Le présent travail analyse la densité, les retraits tangentiel et radial, le PSF et la couleur du bois de l'espèce dans les zones climatiques de trois pays de l'Afrique de l'Ouest (Togo, Burkina Faso et Niger).

### Méthodologie

Trois zones climatiques (Guinéenne, Soudanienne et Sahélienne) situées dans trois pays de l'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Niger et Togo) ont été retenues pour échantillonner les arbres de façon non destructive par prélèvement de carottes.

Dans les trois pays différents, 95 arbres ont été carottés. Chaque carotte de bois a été sciée en deux parties égales, perpendiculairement au sens des fibres du bois. Sur une moitié, des éprouvettes de 1,5 cm de longueur ont été débitées. Un total de 451 échantillons issus des carottes ont été utilisés pour la détermination de l'infra-densité et des paramètres de couleurs. Des modèles de prédiction ont été aussi établis à partir de la spectroscopie proche infra rouge.

### Résultats

L'analyse des valeurs moyennes de l'infra-densité par zone climatique indique une différence en fonction des trois zones considérées ( $P < 0,05$ ) (Fig.1). La plus forte valeur de l'infra-densité est obtenue dans la zone sahélienne soit  $0,78 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  et la plus faible dans la zone guinéenne ( $0,68 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ ). Pour ce qui concerne les retraits tangentiel et radial et le point de saturation des fibres, les résultats indiquent aussi une variation significative d'une zone à une autre ( $P < 0,05$ ). Les paramètres de couleur varient aussi significativement d'une zone climatique à une autre ( $P < 0,001$ ). Les individus provenant de la zone sahélienne sont plus sombres ( $L^* = 48,28 \pm 0,6$ ) et plus rouges ( $a^* = 8,21 \pm 0,19$ ) que ceux provenant des zones guinéenne ( $L^* = 59,65 \pm 0,47$  ;  $a^* = 5,95 \pm 0,19$ ) et soudanienne ( $L^* = 53,74 \pm 0,40$  ;  $a^* = 7,30 \pm 0,16$ ).

Par ailleurs, les résultats de cette étude démontrent l'utilisation possible de la spectroscopie proche infrarouge pour estimer les propriétés du bois de *P. erinaceus*. En effet, la validation

des modèles de prédiction pour les retraits radial et tangentiel le PSF montrent des  $r^2$  de 0,70 ; 0,71 ; 0,92 respectivement avec des RPD de 1,84 ; 1,87 ; 3,57 (Tab. 1).

Pour les paramètres  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  de couleurs, les  $r^2$  sont respectivement de 0,83 ; 0,74 et 0,67 avec des RPD de 2,40 ; 2 ; et 1,70.

Tab. 1: Résultats des modèles PLS en validation croisée des retraits, du PSF et de la densité basale.

Propriétés	Prétraitement	Outliers	N	Mean	SD	Min	Max	SECV	$R^2_{cv}$	$RPD_{cv}$
Retrait T	Snvdd2	2	90	5,8	1,00	3,3	8,8	0,54	0,70	1,84
Retrait R	d1	2	90	3,3	0,70	1,6	5,4	0,38	0,71	1,87
PSF	d1	5	90	19,1	2,20	12,4	25,8	0,62	0,92	3,57
Infra-densité	d1	4	90	0,80	0,06	0,60	0,92	0,02	0,88	2,88

Tab. 2: Paramètres de la validation externe des modèles PLS de  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  (97 échantillons).

Paramètres	Outliers	Min	Max	$R^2P$	SEP	RPD
$L^*$	7	42,11	64,24	0,83	2,32	2,40
$a^*$	6	4,28	13,57	0,74	0,89	2,00
$b^*$	4	11,43	20,67	0,67	1,07	1,70

## Références

Ouedraogo A., Adjima T., Hahn-Hadjali K., Guinko S., 2006. Diagnostic de l'état de dégradation des peuplements de quatre espèces ligneuses en zone soudanienne du Burkina Faso. *Sécheresse*, 17 (4): 485-491.

Sylla SN., Samba RT., Neyra M., Ndoye I., Giraud E., Willems A., de Lajudie P., Dreyfus B., 2002. Phenotypic and Genotypic Diversity of Rhizobia Nodulating *Pterocarpus erinaceus* and *P. lucens* in Senegal. *System. Appl. Microbiol.*, 25: 572-583.

B06

## Les hampes en bois des armes des chasseurs-cueilleurs Yamana et Alakaluf de Patagonie australe : des choix techniques différenciés ?

MAERKY Gisèle

Doctorante, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne,  
UMR 7041, ArscAn, Ethnologie Préhistorique,  
[gisele.maerky@gmx.fr](mailto:gisele.maerky@gmx.fr)

**Mots clés** : Emmanchement, Technologie du bois, Chasseurs-cueilleurs

### Résumé

En archéologie préhistorique, on ne retrouve bien souvent que la pointe lithique ou en os des armes de chasse, pêche et collecte des chasseurs-cueilleurs. Toute la partie manche, faite presque invariablement de bois, a disparu. La pointe, alors seul témoin de l'arme complète, est parfois difficilement interprétable en termes de fonction et nous possédons peu d'informations sur le rôle qu'était donné aux manches au sein de tels objets. C'est ce manque d'informations que nos recherches doctorales entendent pallier. En effet, notre corpus est composé d'objets ethnographiques recueillis par des navigateurs, missionnaires, ethnographes entre la fin de XVIII et le début du XXème siècle auprès de populations qui poursuivaient encore un mode de vie de chasseurs-cueilleurs. Ces objets sont donc complètement conservés, manche en bois compris, ce qui est une belle opportunité de pouvoir nous concentrer sur cet élément. Pour cela, ma thèse se base sur une comparaison des systèmes d'emmanchement des populations subactuelles de Patagonie australe et d'Alaska méridional, des populations qui partagent un même mode de vie et des pratiques de chasses très similaires bien que géographiquement à l'opposé du continent américain. N'étant qu'au début de nos investigations, nous ne présenterons ici que les quelques résultats que nous possédons sur les populations Alakaluf et Yamana de Patagonie australe. Par ailleurs alors que l'un de nos axes de recherche concerne l'adéquation entre la morphologie et la fonction de l'objet, ce poster présente uniquement les deux autres axes de nos recherches qui sont plus directement liés au matériau bois : la sélection du bois et la transformation de cette même matière pour la fabrication des manches.

Ce sera ici l'occasion de se questionner sur les critères de sélection des essences et sur le choix des techniques de travail du bois. Etaient-ils les mêmes pour ces deux groupes ?

Les objets qui composent notre corpus sont des objets tels que des harpons, des lances, des dagues ou encore des fourches de collecte de mollusque. Ils sont aujourd'hui conservés dans plusieurs musées européens et américains. Pour l'instant, nous avons uniquement étudié les objets conservés au Musée du Quai Branly de Paris, au Weltmuseum de Vienne et au Museo Nazionale Preistorico Etnografico Luigi Pigorini de Rome.

L'axe de recherche qui s'intéresse à la sélection du bois consiste à analyser pour chaque manche quelles parties de l'arbre ont été utilisées, quelles essences choisies, et détermine ainsi quelles qualités physico-chimiques et mécaniques de la matière étaient recherchées par ces groupes. Pour cela nous menons une étude xylogique en déterminant les espèces utilisées pour chaque manche. Il faut donc prélever de fins échantillons de bois sur les objets et les observer au microscope. En parallèle, j'étudie quelle partie anatomique de l'arbre était utilisée en repérant les différents plans du bois, en observant les cernes et les nœuds.

Le deuxième axe est l'étude technologique qui concerne l'étape de transformation du bois et qui permet d'identifier les procédés et les méthodes de transformation en jeu mais aussi les outils de transformation utilisés et leur matière premières (coquille, os, lithique ou métal). C'est grâce à la lecture des stigmates techniques laissés sur la matière par le travail du bois

que cette étude est possible. La terminologie employée est largement inspirée de la technologie osseuse par soucis d'harmonisation au sein de la discipline de la Préhistoire.

Nous avons ainsi constaté qu'alors que les Alakaluf et les Yamana sont connus pour avoir une culture matérielle très similaire, un certain nombre de différences concernant les manches de leur équipement de chasse, pêche et collecte peuvent être observées.

Tout d'abord, les espèces que les deux groupes utilisent pour leurs manches ne sont pas les mêmes. Les Yamana utilisent des espèces du genre *Nothofagus* reconnues pour développer un tronc droit et haut au bois quasiment exempt de nœuds. Les cinq objets Alakaluf que nous avons échantillonnés pour l'instant sont eux faits de *Drimys Winteri* et de *Pilgerodendron uviferum* qui développent un tronc moins régulier et pourvu de nombreux nœuds. La partie anatomique choisie est également très différentes, car les Alakaluf utilisent systématiquement de jeunes troncs entiers pour construire leur manche de section arrondie. Les Yamana ne s'intéressent eux, qu'à une section précise sur duramen ou aubier d'un tronc plus large, afin de construire des hampes de section octogonale à base rectangle. Par ailleurs, ces derniers orientent le bois toujours de la même manière avec le plan tangentiel correspondant aux plus petits cotés de la hampe et le plan radial à ses plus grands cotés.

Ces aspects du choix de la matière première influent directement sur la manière dont elle est transformée. Les études technologiques montrent en effet que les Alakaluf, se contentaient d'élaguer les jeunes troncs qu'ils choisissaient puis, de leur faire subir un façonnage d'approche pour régulariser leur surface (rabotage à angle d'attaque faible). Les Yamana devaient, eux, tout d'abord débiter le tronc en le partitionnant pour n'en sélectionner qu'une partie, ce qui nécessitait une grande maîtrise de la technique de fendage. Puis, afin de donner au manche ses huit cotés, ils choisissaient un façonnage d'entame par raclage (rabotage à angle d'attaque fort) ou taille. C'est donc une différence d'investissement technique assez conséquente qui peut être remarquée entre ces deux groupes. En profitant de la morphologie initiale des jeunes troncs pour fabriquer leur manche, les Alakaluf font preuve d'un certain opportunisme que ne se permettent pas les Yamana.

Nous constatons de manière générale que le choix des techniques ou la sélection des espèces ne semblent pas être dictés par la fonction des objets. Ces variations sont donc plutôt à rattacher à des particularités propres à chaque groupe.

Reste donc à savoir ce qui peut expliquer cette différence dans la chaîne opératoire de transformation et dans la sélection de la matière première. Les armes des Yamana étaient-elles plus performantes grâce à cet investissement technique plus lourd ? Ou faut-il simplement voir ici, la marque d'une tradition culturelle ou encore d'un comportement plus ou moins efficient ? Une approche expérimentale sera mise en place prochainement pour avoir une meilleure idée de la manière dont chaque espèce d'arbre de Patagonie se travaille et si des différences à ce niveau auraient pu jouer un rôle dans leur sélection et la manière dont le bois était transformé.

B07

## Technologie du bois végétal au Paléolithique : l'exemple des procédés techniques mis en œuvre par les chasseurs-cueilleurs du Proche-Orient

CHICA-LEFORT Tiphanie<sup>1</sup>, ALIX Claire<sup>2</sup>, SHARON Gonen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UMR 7041, ArScAn « Ethnologie préhistorique », Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8096, Archan, Paris 1 Panthéon-Sorbonne<sup>2</sup>, Tel Hai Academic College (Israël)<sup>3</sup>  
[chicalefort.tiphanie@gmail.com](mailto:chicalefort.tiphanie@gmail.com)

**Mots clés :** expérimentations, dendrométrie, Israël, préhistoire, technologie du bois, xylologie

### Résumé

Depuis le XXème siècle, la recherche préhistorique s'est concentrée sur la connaissance des techniques employées par les populations de chasseurs-cueilleurs parce que ce savoir permet d'appréhender en partie, l'identité des sociétés humaines (Schlanger dir, 2012). Le bois est un matériau communément utilisé par les groupes humains tant ses usages sont pluriels, mais il nous parvient peu en contexte archéologique du fait de sa dégradation rapide. Néanmoins, son emploi au Paléolithique est largement attesté par la tracéologie lithique et on lui attribue une place importante dans la culture matérielle (Claud et al., 2013). Certains contextes exceptionnellement favorables ont même livré de rares objets illustrant l'usage du bois au Paléolithique dans des domaines aussi bien domestiques et cynégétiques que symboliques. Les études sur ces bois ont surtout été orientées sur l'analyse des objets finis et favorisent l'identification des essences. De ce fait, les phases de transformation du bois sont mal connues, alors qu'elles apportent des témoignages essentiels sur les processus techniques. En somme contrairement aux périodes plus récentes, ou aux autres matériaux préhistoriques (roches et os), les problématiques technologiques actuelles n'ont pas été systématiquement appliquées sur le matériel paléolithique en bois.

Préalablement à l'analyse approfondie des phases de transformation du bois, la démonstration d'une utilisation de cette matière première sur les sites préhistoriques, quand elle est préservée, est essentielle, particulièrement lorsque l'on trouve une grande quantité de fragments mais aucun objet fini. C'est le cas du site de Nahal Mahanayeem Outlet (NMO) localisé en Israël dans la vallée du Jourdain. Ce gisement est attribué par datation OSL à 65 000 ans B.P. soit à la fin du Paléolithique moyen régional (Sharon et Oron, 2013). Les restes de végétaux ligneux du site ont été analysés afin de démontrer si certaines des pièces ont fait l'objet de modifications anthropiques. Une étude xylologique et dendrométrie a été couplé à une observation technologique et une analyse spatiale et stratigraphique d'un sous-échantillon des 1437 restes retrouvés sur le site. Le caractère anthropique de l'assemblage encourage à poursuivre l'analyse des bois préhistoriques en développant davantage l'aspect technologique afin d'approfondir notre compréhension des étapes de transformation de la matière.

Pour étudier la technologie, il faut caractériser les macro-traces archéologiques sur les objets finis aussi bien que sur les déchets et concevoir alors une méthode adaptée au matériau bois (Averbouh, 2000). A l'aide d'une approche expérimentale, notre objectif est de créer un référentiel de fractures et de stigmates techniques depuis les phases d'acquisition jusqu'à la transformation d'objets (débitage/façonnage). Divers protocoles expérimentaux vont être conçus pour être appliqué selon les essences, les propriétés et l'état du bois (frais/sec), le mode d'action sur la matière et l'outillage utilisé.

Les bois préhistoriques étant rares, le référentiel expérimental se fondera sur un ensemble de quatre sites israéliens de la vallée du Jourdain où les pièces préservées sont dans un état de fraîcheur remarquable compte tenu de leur ancienneté. L'accès aux collections de Gesher Benot Ya'aqov daté à 780 000 ans B.P., Nahal Mahanayem Outlet, Jordan River Dureijat daté à 14 000 ans B.P. et Ohalo II daté à 23 000 ans B.P. est une occasion unique d'enrichir les connaissances de l'usage et de la transformation des bois sur une très longue durée, du Paléolithique ancien à récent.

### Références

Aberbouh A. (2000) – Technologie de la matière osseuse travaillée et implications paléolithologiques : l'exemple des chaînes d'exploitation du bois de cervidé chez les magdaléniens des Pyrénées, Thèse de Doctorat : Préhistoire et Géologie du Quaternaire, Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris, 500 p.

Brenet M. et al. (2009) – Élaboration d'un protocole d'expérimentation lithique pour la compréhension des comportements techniques et techno-économiques au Paléolithique moyen, *Les nouvelles de l'archéologie*, 118, p.p. 60-64.

Claud É. et al. (2013) – Le travail du bois au Paléolithique moyen : nouvelles données issues de l'étude tracéologique de plusieurs industries lithiques d'Europe occidentale, in P. C. Anderson, C. Cheval, et A. Durand dir, *Regards croisés sur les outils liés au travail des végétaux. An interdisciplinary focus on plant-working tools.*, Antibes, Editions APDCA, p.367-381.

Schlanger N. dir (2012) – Marcel Mauss. Techniques, technologie et civilisation, Presses universitaires de France, (Quadrige, 2012, 481 p.

Sharon G. et Oron M. (2013) – The lithic tool arsenal of a Mousterian hunter, *Quaternary International*, 331, p.p. 167-185.

## Prédiction des paramètres critiques pour le classement mécanique du bois à partir de la mesure de la pente de fil

FAYDI Younes<sup>1</sup>, VIGUIER Joffrey<sup>2</sup>, POT Guillaume<sup>1</sup>, DAVAL Vincent<sup>1</sup>, COLLET Robert<sup>1</sup>, BRANCHERIAU Loïc<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP), Arts et Métiers

ParisTech, F-71250 CLUNY (FRANCE). [Younes.faydi@ensam.eu](mailto:Younes.faydi@ensam.eu),

[guillaume.pot@ensam.eu](mailto:guillaume.pot@ensam.eu), [vincent.daval@ensam.eu](mailto:vincent.daval@ensam.eu), [robert.collet@ensam.eu](mailto:robert.collet@ensam.eu)

<sup>2</sup> Université de Lorraine, ENSTIB/LERMAB, 27 rue Philippe SEGUIN, BP1041, F-88051

Epinal Cedex 9, France. [joffrey.viguier@univ-lorraine.fr](mailto:joffrey.viguier@univ-lorraine.fr),

<sup>3</sup> CIRAD - Département PERSYST, UPR 114 "Biomasse, bois, énergie, bio-produits", TA B114/16 73 Rue Jean François Breton 34398 Montpellier Cedex 5, [loic.brancheriau@cirad.fr](mailto:loic.brancheriau@cirad.fr)

**Mots clés :** Classement mécanique du bois, Modélisation mécanique, Module à la rupture, Pente de fil

### Introduction

La prédiction des propriétés mécaniques du bois est indispensable pour ses applications en construction. Ainsi, les normes européennes imposent de réaliser un classement mécanique. C'est dans cette perspective que plusieurs fabricants de machines de classement attachent une grande importance aux singularités qui influent directement sur les propriétés mécaniques du bois. Cette étude s'intéresse particulièrement à l'orientation des fibres dite « pente de fil » par un développement du modèle de Viguier (2014) permettant d'estimer les principaux paramètres mécaniques caractérisant les sciages.

### Matériels et méthodes

#### ➤ Echantillonnage

Un lot de 805 planches de douglas de différentes sections a été testé (40x100 mm<sup>2</sup>, 50x150 mm<sup>2</sup>, 65x200 mm<sup>2</sup>) dans le cadre du projet ANR CLAMEB fourni par des scieries partenaires du projet.

#### ➤ Appareillages

La mesure de la pente de fil, c'est-à-dire l'orientation des fibres par rapport à l'axe longitudinal, est basée sur l'effet trachéide (Jehl 2011). Nous avons employé le scanner CombiScan+ (LuxScan) qui dispose de lasers points, avec un traitement particulier de ses mesures. Ce scanner comporte aussi une source de rayons X afin de mesurer les densités ponctuelles. Le deuxième appareil utilisé est l'E-Scan. Cette machine s'appuie sur la méthode vibratoire pour déterminer le module d'Young des planches de bois. Afin de valider le modèle, nous avons eu recours à des essais destructifs conduits par FCBA sur des bancs de flexion quatre points, permettant la mesure du module élastique et de la résistance à la rupture.

### Modélisation mécanique

Le modèle vise à calculer deux paramètres mécaniques :

#### ➤ Module élastique global prédit (MOE)

On commence tout d'abord par calculer les modules élastiques élémentaires  $E_{\phi}$  à partir de la cartographie des angles de fil  $\phi$ . Ces derniers sont reliés par l'équation de Hankinson (équation 1) :

$$\frac{E_{\varphi}}{E_0} = \frac{\frac{E_{90}}{E_0}}{\sin(\varphi)^n + \left(\frac{E_{90}}{E_0}\right)\cos(\varphi)^n} \quad (1)$$

$E_0$  : Module élastique pour des fibres parallèles à l'axe longitudinal ( $E_0 = 15\,600$  MPa)

$E_{90}$  : Module élastique pour des fibres perpendiculaires à l'axe longitudinal ( $E_{90} = 1\,370$  MPa)

$n$  : Facteur dépendant du type de sollicitation et optimisé dans notre modèle ( $n = 1.75$ )

Le module élastique global est déduit des cartographies de modules élémentaires en utilisant le principe des travaux virtuels.

➤ Résistance à la rupture prédite (MOR)

Le calcul de la résistance de rupture s'appuie sur la même équation de Hankinson appliquée aux résistances à 0 et 90 degrés. Elle est utilisée pour calculer les résistances de rupture élémentaires. A partir de ces contraintes, on remonte aux moments de flexion limites de chaque élément puis on établit une matrice d'efforts limites. On détermine ensuite la région de rupture qui possède en moyenne les plus faibles efforts. Cette phase nous donne accès à la résistance de rupture considérée comme globale.

### Résultats et discussions

L'ensemble des résultats est résumé dans le tableau 1.

Tab.1 : Coefficients de détermination ( $R^2$ ) entre le modèle et les essais destructifs

Technique de mesure	$R^2$ du MOE	$R^2$ du MOR
Méthode vibratoire	0.80	0.41
Pente de fil + densité globale	0.67	0.50
Pente de fil + vibratoire	0.82	0.58
Rayons X + vibratoire	0.82	0.48

La méthode vibratoire est efficace pour l'estimation du module élastique avec un  $R^2$  de 0.80. La variation de la pente de fil est intéressante, car elle apporte une information supplémentaire à l'échelle locale et améliore ainsi la prédiction du module élastique en la couplant avec la méthode vibratoire. Avec une mesure de densité en plus de la pente de fil, la corrélation sur le MOE est nettement inférieure à ce qui peut être obtenu en utilisant la méthode vibratoire seule ( $R^2=0.67$ ).

Concernant la résistance à la rupture, l'analyse vibratoire donne seulement un coefficient de détermination de 0.41, inférieur aux autres méthodes. Son couplage avec la pente de fil améliore significativement le résultat avec un coefficient de 0.58, ce qui est supérieur au couplage avec les rayons X. L'analyse vibratoire combinée à la mesure de la pente de fil donne les meilleurs résultats.

### Références

- [1] Viguier J., Jehl A., Collet R., Bleron L., Meriaudeau F.(2014), Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling, Wood Material Science and Engineering , 10, pp 145-156.
- [2] Jehl A., Bleron L., Meriaudeau F., Marchal R., (2011), Apport de la mesure de pente de fil au classement mécanique des bois de structures, Congrès Français de Mécanique
- [3] Luxscan Technologies, Weinig Group

### Remerciements

Cette étude est soutenue par le Conseil régional de Bourgogne et par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet CLAMEB ANR-11-RMNP-0015).

## Détermination du module d'élasticité effectif par modélisation du déroulage d'un billon et des propriétés mécaniques intrinsèques du bois de peuplier

GIRARDON Stéphane<sup>1</sup>, DENAUD Louis<sup>1</sup>, POT Guillaume<sup>1</sup>,  
KREBS Michael<sup>1</sup>, COTTIN Fabrice<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers ParisTech, LaBoMaP

[Stephane.Girardon@ensam.eu](mailto:Stephane.Girardon@ensam.eu)

**Mots clés :** Bois Juvénile, Bois Mature, LVL, Module d'élasticité effectif, Peuplier

### Résumé

Un modèle a été développé afin de déterminer le comportement mécanique de panneaux de LVL fabriqués à base de bois de peuplier. Le modèle prend en compte l'évolution des propriétés mécaniques au cours de la vie d'un arbre, permettant de montrer l'impact de l'utilisation de plaquage de bois juvénile sur le module effectif d'un panneau de LVL.

Le modèle repose sur de nombreuses mesures provenant de la littérature (Bao et al. 2001; Bjurhager et al. 2008; Bremaud et al. 2013; Fang et al. 2006; Hein et al. 2013; Rahayu et al. 2014). Le but est d'obtenir le module d'élasticité longitudinal d'un billon en fonction de son âge cambial. En intégrant différentes propriétés du bois de peuplier (vitesse de croissance, angle des microfibrilles, densité, etc.).

Une première phase consiste à dérouler virtuellement un billon représentatif de bois de peuplier, découper les placages résultants, puis les trier en deux groupes selon l'âge cambial. Les placages ont une chance sur deux d'être retournés, inversant ainsi la direction de l'évolution de l'âge cambiale, afin de correspondre au processus de fabrication de panneaux de LVL. Les placages sont ensuite regroupés aléatoirement en un nombre de couche donné, puis découpés en éprouvettes. La figure 1 schématise le procédé de fabrication virtuel des éprouvettes de LVL. Le module d'élasticité effectif de flexion à plat et sur chant sont ensuite calculés pour chaque éprouvette.

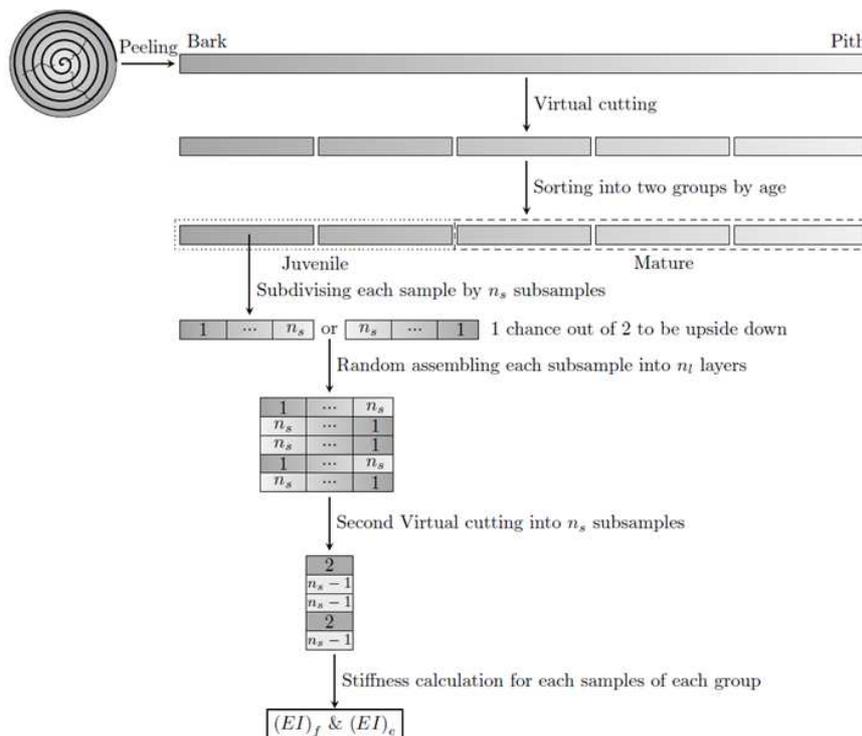


Fig. 1 : Déroulage virtuel et procédé d'assemblage d'éprouvette de LVL

Le processus de fabrication virtuel des éprouvettes intégrant une partie aléatoire, lors du retournement de placage et lors de l'assemblage des plaquages, le processus est réitéré jusqu'à obtenir une population d'éprouvette stable. La stabilité de la population est atteinte lorsque la moyenne et l'écart-type des modules calculés ne varient quasi-plus (moins de 0.01% de variation). La figure 2 montre un exemple de population obtenue pour le déroulage virtuel d'un billon de peuplier de 3 mm d'épaisseur et formant des éprouvettes de section 20 × 21 mm (7 couches de 3 mm).

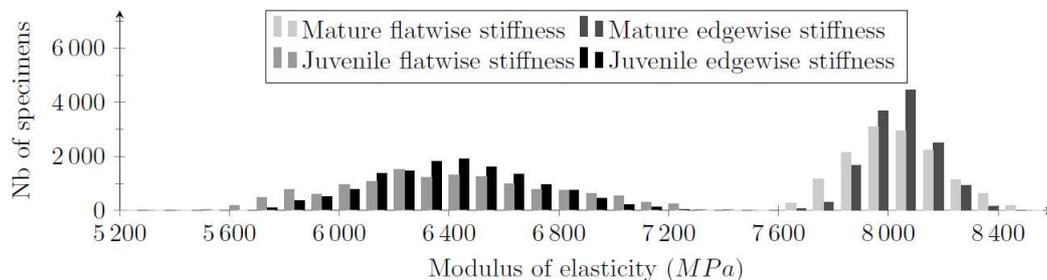


Fig. 2 : Modules d'élasticité effectifs d'éprouvette de LVL de section 20 × 21 mm (7 couches de 3 mm) issus du procédé de déroulage virtuel d'un billon de bois de peuplier

Les valeurs de module d'élasticité effectif sont comparées à des essais expérimentaux, menés par Rahayu et al. (2014). Ces essais permettent de valider le modèle développé en retrouvant des résultats similaires. Le modèle permet de montrer que la direction de sollicitation, ainsi que le nombre de couche n'influent pas sur la valeur moyenne du module d'élasticité effectif, mais uniquement sur sa dispersion. Le modèle montre également l'impact important des propriétés mécaniques du bois juvénile sur le LVL en abaissant la valeur du module d'élasticité effectif de 21.7% en moyenne et en apportant de la dispersion.

Ce modèle doit permettre d'optimiser la quantité de plaquages de bois juvénile au sein de LVL de bois de Peuplier en affectant au minimum ses performances mécaniques.

## Références

- Bao F, Jiang Z, Jiang X, Lu X, Luo X, Zhang S (2001) Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China Wood Science and Technology 35:363-375
- Bjurhager I, Berglund LA, Bardage SL, Sundberg B (2008) Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula* *Populus tremuloides*) using full-field strain measurements Journal of wood science 54:349-355
- Bremaud I, Ruelle J, Thibaut A, Thibaut B (2013) Changes in viscoelastic vibrational properties between compression and normal wood: roles of microfibril angle and of lignin Holzforschung
- Fang S, Yang W, Tian Y (2006) Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones New Forests 31:373-383
- Hein PRG, Silva J, Brancheriau L (2013) Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* E. grandis Maderas Ciencia y tecnologia 15:171-182
- Rahayu I, Denaud L, Marchal R, Darmawan W (2014) Ten new poplar cultivars provide laminated veneer lumber for structural application Annals of Forest Science:1-11

## Identification à l'échelle du cerne des propriétés hydriques du bois par le biais de la méthode de la grille

DANG Djily<sup>1,2</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,2</sup>, TOUSSAINT Evelyne<sup>1,2</sup>, GREDIAC Michel<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Clermont Université, UBP, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171, Aubière, France

[djily.dang@univ-bpclermont.fr](mailto:djily.dang@univ-bpclermont.fr)

### Résumé

Lorsque la teneur en eau intrinsèque du bois est en dessous du point de saturation des fibres (25 à 30 %), toute variation de sa teneur en eau affecte ses propriétés physiques et mécaniques (REMOND *et al* 2007). A cette problématique, s'ajoutent le caractère fortement hétérogène du bois et son anisotropie prononcée, sans omettre la possibilité de couplage de chargement mécanique et de variation de teneur en eau pouvant amplifier les déformations. Le bois est en général étudié comme un matériau orthotrope et homogène dans une direction donnée mais en réalité, il existe des gradients de propriétés mécaniques et physiques dans chaque direction. En effet, le bois est constitué d'une alternance de bois d'été et de printemps (cernes annuels de croissance) qui sont plus réguliers dans la plupart des résineux comparés aux feuillus. Dans le présent document, on s'intéresse à l'étude et à l'identification des propriétés de diffusion hydrique d'un résineux (Sapin Blanc du Massif Central) à l'échelle du cerne. Une telle étude nécessite l'utilisation d'une technique de mesure de champ sans contact, ici la méthode de la grille (BADULESCU *et al* 2009). Cette dernière offre la possibilité d'observer l'hétérogénéité du bois à l'échelle du cerne via des champs de déformations. Elle permet donc d'obtenir la réponse sous sollicitations hydriques (Fig.1) du bois d'été (BE) et de printemps (BP) (DANG *et al* 2014&2015). Cette technique de mesure est couplée à une méthode d'identification inverse des paramètres que nous avons mise en place. Elle permet d'obtenir des coefficients de diffusion de BP et BE dans la direction de diffusion (TT) et les coefficients d'expansion hydrique de BP et BE dans les directions perpendiculaires (RR, LL) à partir des cartes de déformations obtenues par la méthode de la grille. Une illustration de celle-ci est présentée sur un matériau homogène (Figs.2&3).

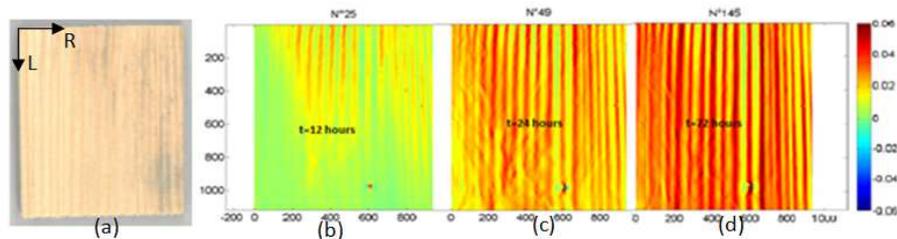


Fig. 2 : Déformations hydriques radiales: (a)-Scan de la face en contact avec la grille, (b)- Réponse après 12 heures , (b)- Réponse après 24 heures, (c)- Réponse après 72 heures.

### Illustration

Le phénomène de la diffusion au sein du bois est régi par la loi de Fick (eq.1). La résolution de celle-ci est faite de manière numérique avec la PDE Toolbox de Matlab. Une illustration de la validation numérique de la méthode d'identification proposée est donnée dans ce qui suit. On considère un matériau homogène d'épaisseur  $L = 8\text{mm}$  de diffusivité  $D_{xx} = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  soumis à une diffusion en adsorption avec comme conditions limites celles indiquées en Fig.2.a. La condition limite sur la face de l'échantillon en contact avec l'eau est de type Dirichlet ( $w = \text{PSF} = 30\%$ ) et celle sur la face en contact avec la grille est de type Neumann ( $dw/dx = 0$ , gradient nul) et la distribution initiale est considérée comme uniforme au sein de l'épaisseur

( $w(x,0)=w_0=12\%$ ). La solution numérique de ce problème avec une discrétisation spatiale de 100 éléments et temporelle de 100 éléments est donnée en Figs.2.b&3.

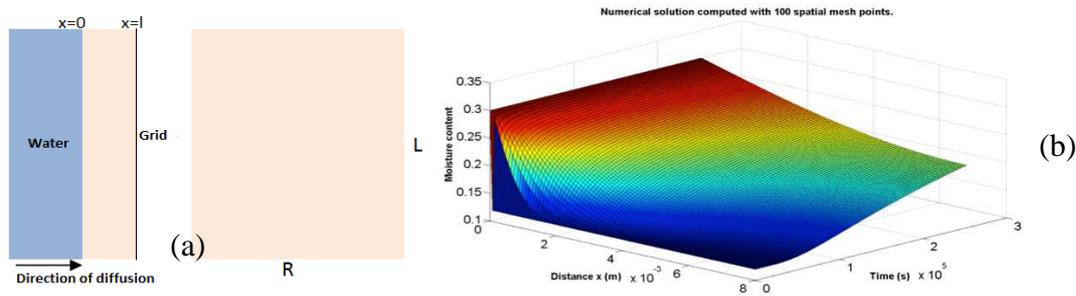


Fig.2: -(a)-Problème posé, -(a)-Solution à chaque instant  $t$  pour chaque position  $0 \leq x \leq L$ .

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (\text{eq.1})$$

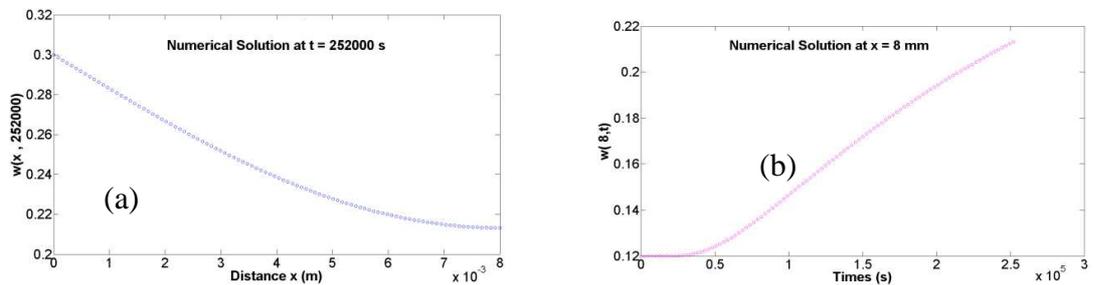


Fig.3:

Solution numérique: -(a)-Dans l'épaisseur, -(b)-Face en contact avec la grille.

La méthode d'identification est axée sur la minimisation d'une fonction coût construite à partir des données simulées dans l'exemple étudié. On note  $\alpha$  le coefficient d'expansion hydrique et la déformation hydrique à tout instant  $t$  en  $x=L$  est telle que  $\varepsilon(L,t)=\alpha\Delta w(L,t)$ . La fonction coût à minimiser est donnée par l'Eq. 2 :

$$F = \sum_{i=1}^N \left[ \varepsilon_{\text{exp}(L,t_i)} - \alpha \Delta w(L,t_i) \right]^2 \quad (\text{eq.2})$$

où  $N$  est le nombre d'éléments pour la discrétisation temporelle.

La minimisation de cette fonction coût permet d'accéder au coefficient de diffusion et au coefficient d'expansion hydrique lorsque les déformations expérimentales à chaque instant  $t$  sont connues. Cette méthode sera appliquée pour identifier les propriétés de comportement hydrique du bois à l'échelle du cerne à partir des déformations dans BP et BE obtenues avec la méthode de la grille (Fig.1) au fil du temps, lors d'un essai de diffusion hydrique.

## Références

BADULESCU C, GRÉDIAC M and MATHIAS J-D (2009): Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement: Measurement Science and Technology 20 (9):1-17.

RÉMOND R, PASSARD J and PERRE P (2007): The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending: European Journal of Mechanics of Solids 26:558-572.

DANG D, MOUTOU PITTI R, TOUSSAINT E and GRÉDIAC M (2014): Experimental evidence of water diffusion gradient in wood using the grid method: Final Cost Action FP0904 Conference. May 19-21, Skellefteå, Sweden.

DANG D, TOUSSAINT E, GRÉDIAC M, MOUTOU PITTI R (2015): Investigation of the hydric transfer phenomenon in wood at the ring scale with the grid method: SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics. June 8-11, Costa Mesa, USA.

B11

## Modification superficielle du bois par plasma froid

NERGUIDIMA Mathurin<sup>1</sup>, MENECHIER Sébastien<sup>1</sup>, PERISSE Frédéric<sup>1</sup>

Institut Pascal, UMR 6602, Université Blaise Pascal/CNRS/IFMA, BP 10448, F-63000

Clermont-Ferrand

[sebastien.menechier@univ-bpclermont.fr](mailto:sebastien.menechier@univ-bpclermont.fr)

**Mots clefs :** Barrière diélectrique, Mouillabilité, Plasma froid

### Résumé

La technologie de plasma froid est un procédé émergent offrant de nombreuses applications potentielles dans le domaine industriel. Ce procédé est utilisé pour les traitements de surface. La technique des plasmas froids consiste à exposer l'objet à une décharge au contact d'un gaz activé par un champ magnétique et constitué de particules neutres, d'ions et d'électrons. Selon la nature du gaz employé, deux effets opposés peuvent se produire : une activation à la surface qui permet d'augmenter l'énergie de surface, et une passivation avec une baisse de cette énergie, jouant ainsi sur les propriétés de mouillabilité de la surface.

Dans les industries de transformation du bois, des traitements d'imprégnation sont réalisés dans le but d'apporter une protection améliorant la durabilité. La durabilité maximale est obtenue avec une imprégnation complète du bois, la plupart des procédés utilisés dans l'industrie ne permettent pas d'obtenir une pénétration des produits de traitement en profondeur. Cette problématique ouvre des voies à la recherche afin de trouver une solution pour améliorer les propriétés d'absorption du bois. C'est dans cette optique qu'a été développé un procédé de traitement du bois par plasma froid à l'Institut Pascal. Une torche à barrière diélectrique (DBD) a été développée pour traiter des échantillons de bois. L'efficacité du traitement en termes de mouillabilité est évaluée par mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur le bois et corrélée avec des mesures de compositions superficielles du bois.

### Montage expérimental

La figure 1 représente l'ensemble du dispositif mis en œuvre, il est constitué de trois parties principales :

- l'alimentation basse tension qui permet d'obtenir une tension à fréquence variable de 0 Hz à 30k Hz, associé au transformateur haute tension qui permet d'obtenir des tensions jusqu'à 8kV efficace ;
- le système de déplacement linéaire qui permet de réguler la vitesse de déplacement de l'échantillon devant la torche DBD ;
- la torche DBD circulaire développée au sein du laboratoire.

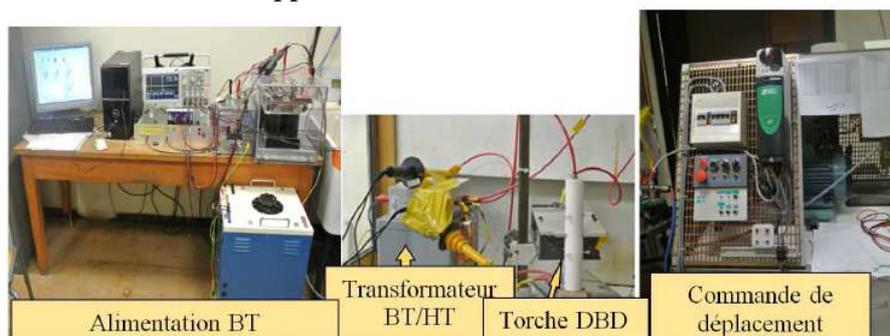


Fig.1 : Dispositif expérimental

## Résultats

Les paramètres vitesse de traitement, fréquence et tension électrique ainsi que le débit de gaz plasmagène (air) ont été testés. Les résultats montrent une nette amélioration dans tous les cas des propriétés des bois étudiés. La figure 2 montre par exemple les résultats obtenus en faisant varier la vitesse de traitement d'un échantillon de bois Douglas. Sans traitement, l'angle de contact d'une goutte sur ce bois est d'environ 70°. Avec un traitement lent de 1 mm/s (tension 8 kV à 25 kHz avec un débit d'air de 70 L/min), l'angle de contact chute à environ 10°. Le traitement est donc très efficace pour améliorer les propriétés de mouillabilité.

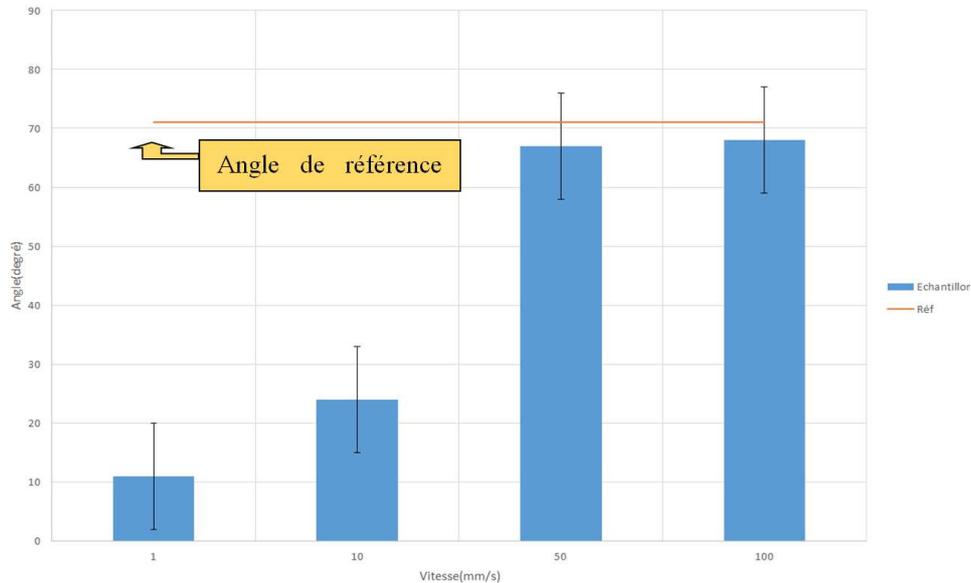


Fig. 2 Variation d'angles de contact en fonction de la vitesse

Les paramètres de traitements ont été optimisés pour obtenir un mouillage parfait des surfaces et les résultats ont été corrélés aux mesures de compositions superficielles qui montrent une augmentation du rapport O/C à la surface lorsque la mouillabilité de la surface est améliorée.

## Références

- [1] Menandro N. Acdaa, Edgar E. Devera, Rico J. Cabangon, Henry J. Ramos, Effects of plasma modification on adhesion properties of wood, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 32 (2012) 70–75
- [2] Christian Lux, Zsolt Szalay, Wilfried Beikircher, Dusan Kovacic, Hans K. Pulker, Investigation of the plasma effects on wood after activation by diffuse coplanar surface barrier discharge, *Eur. J. Wood Prod.* (2013) 71:539–549 DOI 10.1007/s00107-013-0706-3
- [3] Yousoo Hana, Sorin O. Manolachb, Frank Denesc, Roger M. Rowell, Cold plasma treatment on starch foam reinforced with wood fiber for its surface hydrophobicity, *Carbohydrate Polymers* 86 (2011) 1031– 1037

## Un modèle incrémental 3D pour le comportement mécanosorptif du bois

NGUYEN Sung Lam<sup>1,2</sup>, DESTREBECQ Jean-François<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448,  
F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France  
[Sung-Lam.Nguyen@ifma.fr](mailto:Sung-Lam.Nguyen@ifma.fr)

**Mots clés :** mécanosorption, viscoélasticité, hygroverrou, forme incrémentale.

### Résumé

Le comportement hygromécanique du bois est gouverné par les effets mécanosorptifs dus à l'interaction entre le chargement mécanique et les variations d'humidité. Ceci inclut « l'effet hygroverrou », i.e. le blocage de la déformation en phase de séchage sous contrainte (Grill 1988, Dubois 2005, Husson 2010, Saifouni 2014). Ce travail présente une loi incrémentale à pas de temps fini pour simuler le comportement mécanosorptif du bois. La forme incrémentale est développée sous humidité variable, en tenant compte de l'orthotropie 3D et des effets viscoélastique et hygroverrou. La déformation hygroverrou n'existe que dans la direction longitudinale ; sa loi d'évolution est basée sur des observations expérimentales dans le respect des principes thermodynamiques. La formulation incrémentale ainsi établie permet de pallier le problème de mémoire. A titre d'exemple, elle est appliquée à la simulation de l'évolution de la flèche d'une poutre exposée à des variations d'humidité.

### Modèle hydromécanique

Le modèle est basé sur l'hypothèse de partition de la déformation, comme suit

$$\{\mathcal{E}\} = \{\mathcal{E}_w\} + \{\mathcal{E}_e\} + \{\mathcal{E}_{ve}\} + \{\mathcal{E}_{HL}\} \quad (1)$$

où  $\{\mathcal{E}_w\}$  est la déformation hydrique,  $\{\mathcal{E}_e\}$  la déformation élastique,  $\{\mathcal{E}_{ve}\}$  la déformation viscoélastique pure et  $\{\mathcal{E}_{HL}\}$  la déformation hygroverrou. Cette expression est schématisée par un modèle analogue donné à la Figure 1.

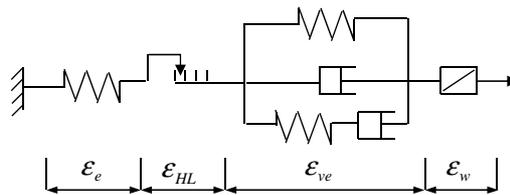


Fig. 1 : Modèle analogue

La loi d'évolution de la déformation hygroverrou est établie sur la base des essais réalisés par Saifouni (2014), dans le respect des principes thermodynamiques, en distinguant les phases de séchage ( $\dot{w} < 0$ ) et d'humidification ( $\dot{w} > 0$ )

$$\{\dot{\mathcal{E}}_{HL}\} = \frac{E'_L(w)}{E_L^2(w)} \dot{w} \{\tilde{\sigma}\} [1_L] \text{ avec } \begin{cases} \dot{w} < 0 : \{\tilde{\sigma}\} = \{\sigma\} \\ \dot{w} > 0 : \{\tilde{\sigma}\} = [\zeta(w)] \{\mathcal{E}_{HL}\} \text{ où } [\zeta(w)] = \frac{E_L(w)E_L(\bar{w})}{E_L(w) - E_L(\bar{w})} [1_L] \end{cases} \quad (2)$$

où  $E_L(w)$  est le module Young longitudinal en fonction de la teneur en eau  $w$ .  $\{1_L\}$  et  $[1_L]$  sont respectivement un vecteur et une matrice où le terme correspondant à la direction longitudinale est égal à l'unité, les autres termes étant nuls.

Sur la Figure 1, la partie viscoélastique pure est schématisée par une cellule de Kelvin en parallèle avec une branche de Maxwell. Combiné au ressort élastique extérieur, ce modèle hybride est équivalent à un modèle de Maxwell généralisé, ce qui permet d'écrire la matrice de relaxation viscoélastique comme suit

$$[R(t, w)] = [\rho(t, w)][A(w)] \quad (3)$$

$[A(w)]$  est la matrice de rigidité élastique orthotrope fonction de la teneur en eau.  $[\rho(t, w)]$  est une matrice diagonale formée des fonctions de relaxation adimensionnelles. Chaque fonction est représentée par la série de Dirichlet ci-dessous dont les paramètres  $a_\mu$ ,  $b_\mu$  et  $\beta_\mu$  sont à déterminer à partir des données expérimentales par la méthode des moindres carrés

$$\rho(t, w) = \sum_{\mu=0}^r (a_\mu + b_\mu w) e^{-\beta_\mu t} \quad (4)$$

Les incréments des parts élastique et viscoélastique pure de la déformation totale sous chargement et humidité variables sont obtenus par l'intégrale de Boltzmann appliquée à chaque intervalle de temps  $[t; t + \Delta t]$ . La forme incrémentale est obtenue en sommant l'ensemble des incréments élémentaires ainsi obtenus, ce qui donne finalement

$$\{\Delta \varepsilon\} = [\eta] \{\Delta \sigma\} + \{\xi\} \quad (5)$$

où  $[\eta] = [\eta_{eve}] + [\eta_{HL}]$  et  $\{\xi\} = \{\xi_{eve}\} + \{\xi_{HL}\} + \{\Delta \varepsilon_w\}$ .

### Applications

A titre d'exemple, le modèle est appliqué à la simulation de la flèche d'une poutre soumise à un chargement constant sous humidité variable (Figures 2 et 3). La comparaison de la flèche avec ou sans effet hygroverrou met en évidence l'influence de cet effet sur la réponse de la poutre. Ce résultat confirme la nécessité de tenir compte de l'effet hygroverrou pour le calcul des structures bois sous humidité variable.

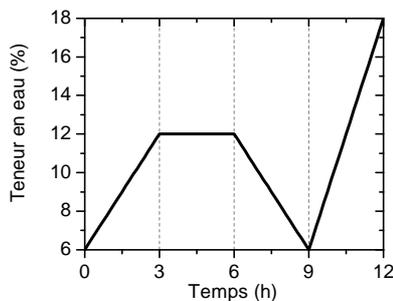


Fig. 2 : Evolution de la teneur en eau

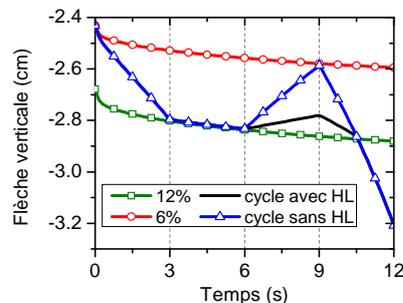


Fig. 3 : Evolution de la flèche à mi-portée

### Références

Dubois F., Randriambololona H., Petit C. (2005) Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol.9, pp.137-202.

Gril J. (1988) Une modélisation du comportement hygro-rhéologie du bois à partir de sa microstructure. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Husson J.M., Dubois F., Sauvat N. (2010) Elastic response in wood under moisture content variations : analytic development. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol.14, pp.203-217.

Saïfouni O. (2014) Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux: application au comportement mécanosorptif du bois. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont 2

**B13**

**Réactivité de fibres végétales vis-à-vis de la fluoration : vers une réduction de l'hydrophilie du bois**

POUZET Martial<sup>1,2,3</sup>, CHARLET Karine<sup>1</sup>, DUBOIS Marc<sup>2,3</sup>, BEAKOU Alexis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Pascal, UMR 6602 UBP/CNRS/IFMA, BP 265, 63175 Aubière, France

<sup>2</sup>Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut de Chimie de Clermont-Ferrand, BP10448, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup>CNRS, UMR 6296, Institut de Chimie de Clermont-Ferrand, 63177 Aubière, France

[Martial.POUZET@univ-bpclermont.fr](mailto:Martial.POUZET@univ-bpclermont.fr)

**Mots clefs :** caractérisation physico-chimique, cellulose, fibres végétales, lignine, traitement de surface

**Contexte et problématique**

La variété d'applications du bois est très large (industrie papetière, ameublement, menuiserie, bâtiment...). Ce matériau possède en effet de nombreux avantages tels que sa disponibilité et son caractère écologique. Cependant, le bois est un matériau particulièrement sensible au changement d'humidité ambiante. Le gonflement et le retrait engendrés par l'absorption et la désorption d'eau peuvent provoquer des fissures dans le volume du matériau bois, le rendant ainsi inutilisable pour certaines applications.

Différents traitements permettant de réduire l'hydrophilie du bois ont été développés (traitement thermique, estérification...), mais peu d'entre eux sont réellement convaincants à l'échelle industrielle du fait de leur aspect énergivore, toxique et/ou peu écologique.

**Méthode et résultats**

Pour répondre à cette problématique, un traitement ne requérant ni solvant ni chauffage a été étudié : la fluoration. Ce traitement, déjà testé sur des échantillons de bois par F. Saulnier (2013), a été appliqué à différentes essences de bois, à l'état massif et pulvérulent. Afin de comprendre les mécanismes réactionnels en jeu lors de la fluoration de ces essences, les composants majeurs du bois (lignine et cellulose) ainsi que différentes fibres végétales (lin et coton) ont été traités par du fluor gazeux.

Cette étude a notamment démontré un lien direct entre la composition chimique des échantillons et la quantité de liaisons C-F créées par greffage covalent d'atomes de fluor à leur surface. En outre, la température et le temps de fluoration ont été optimisés pour obtenir un greffage maximal sans endommager le matériau. La surface du bois, initialement hydrophile, acquiert ainsi un caractère hydrophobe comparable à celui du téflon, comme le montrent les mesures d'angles de contact à l'eau (Fig. 1).

Les prochaines étapes de ce travail de thèse portent sur l'évaluation de la durabilité de ce traitement ainsi que son influence sur le comportement mécanique du bois.

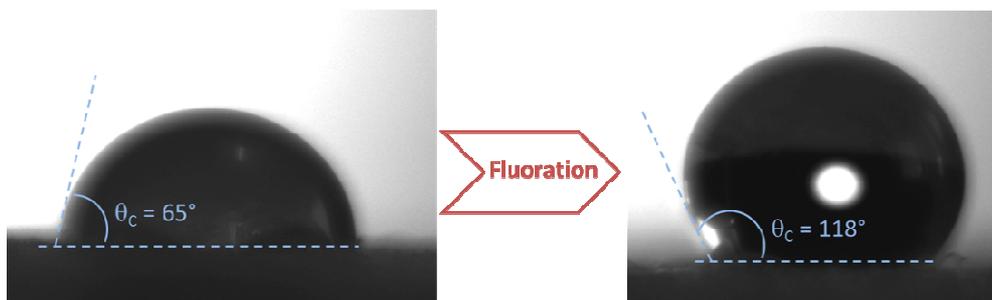


Fig. 1 : Angles de contact d'une goutte d'eau sur un échantillon massif de sapin avant fluoration (à gauche) et après fluoration (à droite)

### Références

F. Saulnier, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, 12 décembre 2013.

B14

**Etude paramétrique de la propagation de fissure en mode mixte : application au matériau bois**

EL KABIR Soliman<sup>1,4</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,2</sup>, RECHO Naman<sup>1,2</sup>, LAPUSTA Yuri<sup>3</sup>, DUBOIS Frederic<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Clermont Université, Institut Pascal, BP 10448, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, 63171 Aubière, France

<sup>3</sup>Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA), Institut Pascal, 63171 Aubière, France

<sup>4</sup>Université de Limoges, Centre du génie Civil, GEMH, 19300 Egletons, France

[Soliman.El\\_Kabir@etudiant.univ-bpclermont.fr](mailto:Soliman.El_Kabir@etudiant.univ-bpclermont.fr)

**Mots clefs :** Eprouvette MMCG, Fissure stable, Intégrale  $M\theta$ , Mode mixte, Taux de restitution d'énergie

**Résumé**

Les structures en bois sont souvent soumises à des modes de chargement combinés dites mixtes. MOUTOU PITTI et al (2011) a développé une nouvelle éprouvette appelée MMCG (Mixed Mode Crack Growth) qui permet de mieux étudier la propagation de fissure dans le matériau bois en mode mixte. Cette éprouvette permet d'observer une plage importante de stabilité le long de la fissure qui s'exprime par la diminution du taux de restitution d'énergie.

Le travail réalisé est une étude numérique sur différentes tailles et épaisseurs de l'éprouvette MMCG pour s'assurer de la stabilité de la propagation de fissure en mode mixte par l'utilisation des intégrales invariantes (figure1).

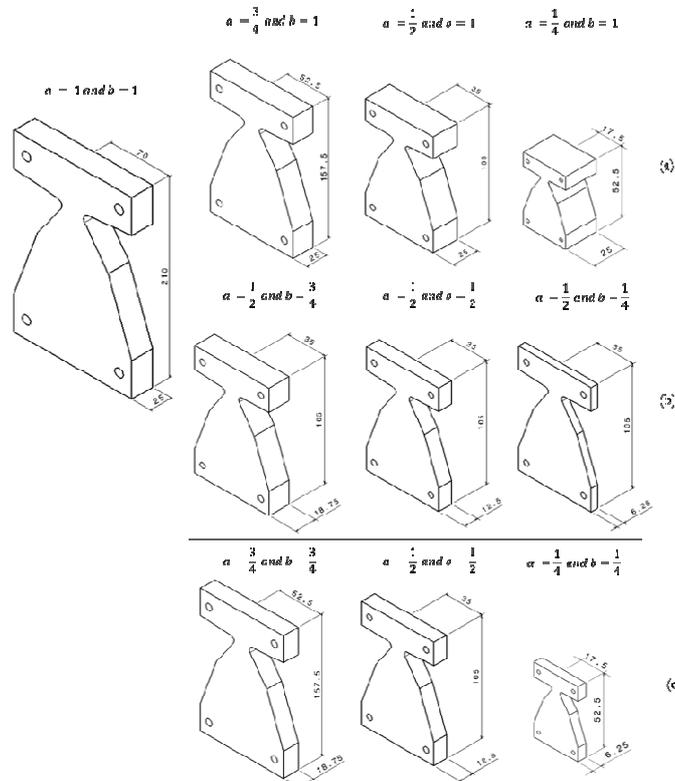


Fig. 1 : Présentation de l'éprouvette MMCG pour: (a): différents facteurs de tailles a, (b): différents facteurs d'épaisseurs b et (c): la combinaison des deux

Grace à l'utilisation de l'intégrale  $M\theta$  qui combine des champs de déplacements réels et virtuels, le taux de restitution d'énergie est calculé en mode d'ouverture et en mode de cisaillement. L'intégrale  $M\theta$  est définie sur un contour surfacique qui contient la pointe de la fissure :

$$M\theta = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij}^u \cdot v_{i,k} - \sigma_{ij}^v \cdot u_i) \cdot \theta_{k,j} dV \quad (1)$$

Un calcul élément finis est réalisé par le logiciel Castem, développé par le CEA. Le matériau utilisé est le bois de type Douglas et il a les caractéristiques élastiques suivantes : module longitudinal  $E_x=14100\text{MPa}$ , module transversal  $E_y=2040\text{MPa}$ , module de cisaillement  $G_{xy}=925\text{MPa}$ , et le module de Poisson  $\nu_{xy}=0,4$ . Son comportement est considéré comme élastique orthotrope, et on se place dans l'hypothèse des contraintes plane. L'éprouvette MMCG est sollicitée en mode mixte à  $45^\circ$ .

Les résultats obtenus représentent l'évolution du taux de restitution d'énergie  $G$  en fonction de la longueur fissure pour différents facteurs de tailles  $a$  et d'épaisseurs  $b$ . Un cas significatif est représenté dans les figures ci-dessous.

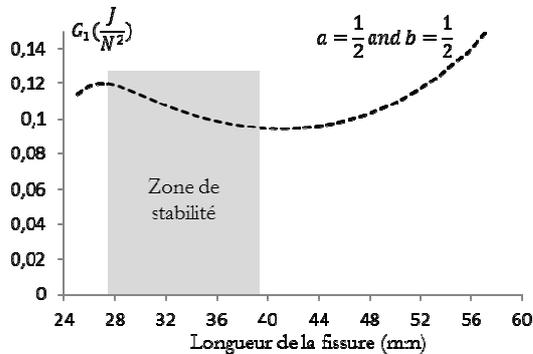


Fig. 2 : Taux de restitution d'énergie en mode mixte (part du mode I)

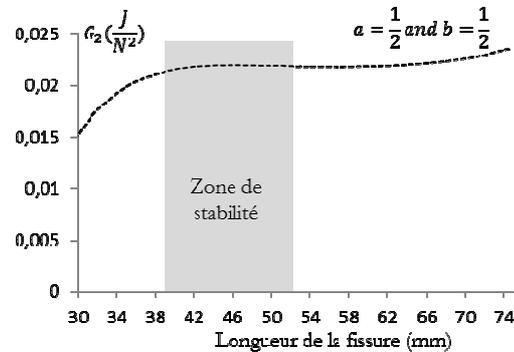


Fig. 3 : Taux de restitution d'énergie en mode mixte (part du mode II)

La stabilité est observée dans l'ensemble des autres cas testés (figure 1) par EL KABIR et al (2015). On a montré également que l'épaisseur influe sur l'évolution du taux de restitution d'énergie lors de la propagation de la fissure dans l'éprouvette MMCG en bois.

L'étude numérique réalisée sur différentes tailles et épaisseurs de l'éprouvette MMCG en mode mixte à  $45^\circ$ , a permis de vérifier l'effet de la variation de la géométrie sur l'évolution du taux de restitution de l'énergie et sur la stabilité de la fissure.

En perspective l'intégration d'un nouveau critère de bifurcation ainsi que l'extension de l'étude de la stabilité sur le mode mixte en 3D est nécessaire. Une étude expérimentale est également envisagée.

## Références

Dubois F., Moutou Pitti R., Pop O. (2011) A proposed mixed-mode fracture specimen for wood under creep load, *Int. J. Fract.*, 167 195–209

Dubois F., El kabir S., Lapusta Y., Moutou Pitti R., Recho N. (2015) Numerical study of crack path by MMCG specimen using M integral, *Frattura ed Integrità Strutturale*, XX (2015) qq-rr; DOI: 10.3221/IGF-

## Transferts hygroscopiques dans le bois : Caractérisation de champs hydriques par imagerie électrique

NGUYEN Tuan Anh<sup>1</sup>, ANGELLIER Nicolas<sup>1</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>1</sup>, ULMET Laurent<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France  
[nicolas.angellier@unilim.fr](mailto:nicolas.angellier@unilim.fr)

**Mots clés :** bois, diffusion, inversion, résistivité

### Contexte et problématique

Ce travail présente une approche expérimentale et numérique dans le but d'adapter des mesures résistives au monitoring in-situ d'ouvrages en bois vis-à-vis de l'humidité. Elle repose sur l'identification du champ de résistivité du bois, corrélé à sa teneur en eau par le biais d'une loi de passage, par recoupement des lignes de courant injectées par des électrodes connectées aux surfaces accessibles de l'élément à étudier. L'approche repose sur l'inversion d'un modèle numérique qui simule la mesure physique en termes d'injection de courant et de mesure de différence de potentiel d'un quadripôle électrique. L'algorithme d'optimisation est développé afin de reconstruire le champ de résistivité du milieu à partir des données de résistivités mesurées.

### Injection de courant électrique

Le résistivimètre, composé d'un système de multiplexage et d'une source d'énergie, transmet un courant via deux électrodes d'injection et mesure une différence de potentiel entre deux autres électrodes. Un module diviseur de courant, des faisceaux de câbles spécifiques et des électrodes miniatures ont été nécessaires pour s'adapter au matériau bois qui présente des gammes de résistivité élevées. Le protocole proposé concerne une mesure en deux dimensions par ceinturage sur des échantillons de Douglas cubiques. Le dispositif est composé du résistivimètre connecté à une centrale d'acquisition et d'un dessiccateur conditionné à une température de 20°C et une humidité relative de 86%HR. Toutes les configurations de quadripôle en dipôle-dipôle sont exploitées afin d'investiguer l'ensemble de la section transversale et d'avoir une forte densité des points de mesure à la surface et à cœur, Fig.1.

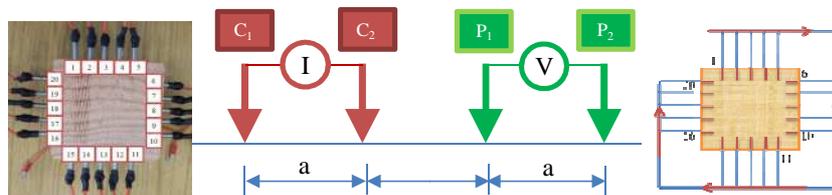


Fig. 1 : Echantillon, modèle dipôle-dipôle et schéma de multiplexage

### Modèle numérique et méthode inverse

Nous proposons un modèle par éléments finis permettant de simuler l'algorithme de mesure couplant une résolution de la loi d'Ohm à une procédure de multiplexage en concordance avec le protocole expérimental. La forme tridimensionnelle de l'injection impose une discrétisation spatiale des électrodes cylindriques considérées comme des milieux conducteurs parfaits et du volume de l'échantillon, mais le caractère symétrique des configurations étudiées autorise à n'en mailler que la moitié. Pour valider le modèle, nous traitons le cas d'un gradient de résistivité exponentiel selon la direction tangentielle, avant de

simuler numériquement la mesure électrique de résistances en intégrant les boucles de multiplexage, Fig. 2.

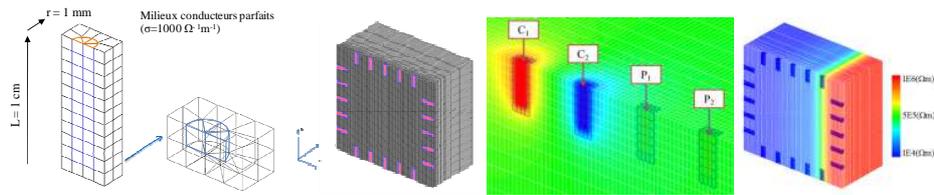


Fig. 2 : Maillage pour l'injection numérique de courant dans un champ de résistivité

Nous développons une méthode d'optimisation afin d'estimer le champ de résistivité réel dans les échantillons en minimisant l'écart entre les données mesurées et les données calculées par le biais de l'algorithme de Levenberg-Marquadt. Le milieu, de dimensions finies, investigué est discrétisé par une grille dans laquelle la résistivité est constante dans chaque bloc, Fig. 3. La validation s'effectue en utilisant des données résolues par le modèle direct, injectées dans le modèle inverse comme des données mesurées. La solution de départ, un champ de résistivité homogène, est suffisamment éloignée de la solution en termes de résistivité. Le résultat estimé présente une erreur moyenne de 2% entre les résistivités estimées et réelles. Indépendamment de l'algorithme d'inversion, les résultats expérimentaux dépendent directement de la capacité du résistivimètre à effectuer des mesures sur de longues lignes de courant dans un milieu sec fortement résistif. Les valeurs de résistivité identifiées mettent en évidence une hétérogénéité là où un champ de résistivité relativement homogène est attendu du fait que les mesures électriques s'effectuent à un état hydrique proche de l'équilibre. Cependant, la résistivité moyenne obtenue est de  $2.4 \cdot 10^5 \cdot m$ , ce qui est compatible avec la valeur de teneur en eau attendue dans notre cas de conditionnement.

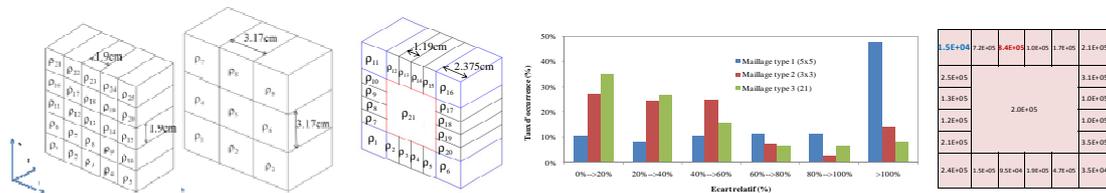


Fig. 3 : Grilles de discrétisation étudiées, occurrence de l'écart entre les résistances mesurées et simulées, résistivités identifiées ( $\cdot m$ )

### Conclusion et perspectives

Nous avons développé une stratégie 2D de détermination des champs hydriques dans une section transversale par le biais d'une mesure résistive en ceinturage et d'un modèle d'inversion. Des difficultés de mesure sont rencontrées telles que de hautes valeurs de résistivité, des lignes de courant importantes induisant des limites physiques de l'injection de courant. Nous disposons cependant d'un outil numérique 3D d'inversion complet et opérationnel, dont l'algorithme permet de diminuer l'écart entre résistances mesurées et calculées. La précision obtenue demeure aujourd'hui partiellement satisfaisante pour une approche monitoring d'ouvrages exposés aux intempéries. Plusieurs pistes d'amélioration sont aujourd'hui envisagées. Une étude paramétrique du type, du nombre et de l'implantation des électrodes doit permettre une optimisation de l'approche en considérant, également, d'autres configurations de quadripôles (traversant, équatorial). On envisage également de poursuivre l'adaptation de la tête de mesure (changement de résistivimètre) et de remplacer les « blancs » de mesure par une simulation numérique du processus de diffusion en adaptant les propriétés de diffusion optimisées sur les mesures faites en périphérie avec une phase d'apprentissage comme le ferait un système expert.

B16

## Comportement différé de poutres en flexion : cas des essences et climats tropicaux

DUBOIS Frédéric<sup>1</sup>, SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>, MANFOUMBI Nicaise<sup>2</sup>, ANGELLIER Nicolas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Mécanique des Matériaux Fibreux, Unité de Recherche en Mécanique des Matériaux, Université des Sciences et Techniques de Masuku, B.P. 901 Franceville, Gabon  
[frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

**Mots clés :** couplages hygro mécaniques, diffusion, effets climatiques, fluage

### Contexte et problématique

En Afrique francophone, la conception des ouvrages en bois repose sur l'Eurocode 5. Et la maîtrise du comportement des essences employées sous climats tropicaux ne s'appuie pour l'instant que sur celui des résineux en climat tempérés d'Europe. Ce travail se focalise donc sur une première approche de l'adaptation des règles Eurocode à des essences et climats tropicaux. Nous proposons une approche expérimentale sur la base du comportement différé en flexion en y définissant de nouvelles classes de service et une estimation de coefficient  $k_{def}$ , coefficient majorant des flèches instantanées des poutres de structure pour la prise en compte du fluage.

### Approche réglementaire et ses limites

Pour concevoir des structures en bois, il est nécessaire de prendre en compte, à la fois, le comportement mécanique à long terme du matériau bois et les effets climatiques en termes d'humidité interne. L'Eurocode 5 donne des pistes pour intégrer, à la fois, un comportement différé et les effets climatiques. Le premier est pris en compte à travers une classe de durée de charge associée aux combinaisons d'action et leurs pondérations.. Les seconds sont intégrés dans la classe de service qui propose trois scénarios climatiques spécifiques telle qu'une ambiance intérieure ou extérieure abritée ou non des intempéries. Au final, le couplage entre classe de durée de charge et classe de service se traduit par un coefficient de pondération  $k_{def}$ .

Par exemple, si  $u_{inst}$  représente la flèche théorique d'une poutre en flexion, l'Eurocode 5 considère une flèche à long terme  $u_{dif}$  telle que :

$$u_{dif} = u_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (1)$$

Cependant, l'approche réglementaire manque de sensibilité. L'Afrique francophone utilise aujourd'hui l'Eurocode 5 pour le dimensionnement de ses structures bois. Si l'approche réglementaire est standardisée à l'échelle européenne, elle est toutefois exclusivement basée sur le comportement des résineux ; elle nécessite une adaptation pour des climats tropicaux très humides ou des ambiances climatisées et pour des essences tropicales qui sont très différentes de celles employées en Europe.

### Protocole expérimental

L'objectif de cette campagne expérimentale est la caractérisation du comportement d'éléments en bois tropicaux en reproduisant, pour un climat tropical, l'équivalent des trois classes de service, à savoir, une configuration en intérieur climatisé, en extérieur à l'abri ou non des intempéries comme la pluie ou le rayonnement solaire direct. Les poutres ont une portée de 1m80, une hauteur de 180mm et une épaisseur de 45mm, Fig. 1. Elles sont chargées en

flexion quatre points par des blocs de béton. La flèche  $u_{dif}(t)$  est mesurée grâce à un capteur LVDT relié à une centrale d'acquisition, les données étant complétées des mesures de température et d'humidité relative. Deux essences sont testées, l'Ozigo et le Moabi. Lors de la mise en charge, il est relevé la flèche instantanée  $u_{inst}$ .



Fig. 1 : Essais de fluage en conditions de service

### Résultats expérimentaux

L'analyse des flèches mesurées permet d'identifier l'évolution du coefficient  $k_{def}$  telle que :

$$k_{def}(t) = \frac{u_{dif}(t)}{u_{inst}} - 1 \quad (2)$$

La Fig. 2 montre l'évolution temporelle du coefficient  $k_{def}$ . La comparaison entre les valeurs expérimentales et les coefficients donnés par l'Eurocode (valeurs en pointillés) met en évidence une réelle nécessité de proposer un  $k_{def}$  spécifique principalement en intérieur climatisé et en extérieur sous abri.

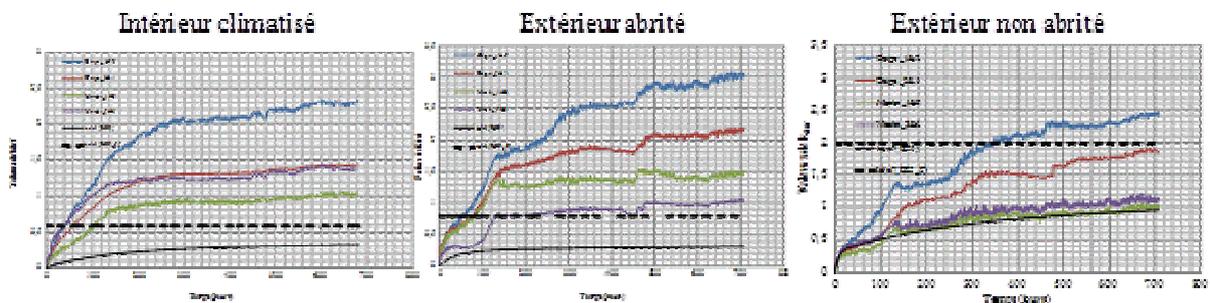


Fig. 2 : Evolution temporelle de  $k_{def}$  selon les conditions climatiques

### Conclusions

Ce travail expérimental montre en effet que l'utilisation des règles Eurocode 5 pour des essences et des climats éloignés des standards européens nécessite des études spécifiques d'adaptation des coefficients de pondération. L'étude porte ici sur l'adaptation de  $k_{def}$ , mais la correction vis-à-vis de la résistance de calcul  $k_{mod}$  paraît également une nécessité. Sans aller aussi loin, la conception des structures en Europe utilisant des feuillus nous force à nous poser les mêmes questions. Où encore, l'utilisation de poutres entaillées nécessite également des études similaires pour prendre en compte l'interaction du climat sur les fissures. Ces deux perspectives font l'objet aujourd'hui de deux projets ANR, respectivement EFEUR5 et CLIMBOIS dans lesquels notre laboratoire est engagé.

B17

## Qualité de l'Air Intérieur et performance énergétique des maisons ossature bois

SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>, DESAUZIERS Valérie<sup>2</sup>, PLAISANCE Hervé<sup>2</sup>, MOCHO Pierre<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GEMH Génie Civil & Durabilité, Université de Limoges, 19300, Egletons, France

<sup>2</sup> C2MA, Ecole des Mines d'Alès

<sup>3</sup> LaTEP, Université de Pau et des Pays de l'Adour

[nicolas.sauvat@unilim.fr](mailto:nicolas.sauvat@unilim.fr)

**Mots clefs :** Ossature bois, Qualité de l'air, mesure du confort, démonstrateur

### Contexte

BOISPE, Construction Bois Pôle Egletons, est un centre de formation et de ressources pour les acteurs de la constructions bois, tout corps d'états confondus, Figure 1. En tant qu'objet d'études et de formation, les trois maisons ont été particulièrement suivies lors de la construction. Elles ont été le support de deux programmes d'essais visant à apporter une expérience de terrain sur deux sujets sensibles pour la construction ossature bois :

- Qualité de l'Air Intérieur
- Performance énergétique, notamment d'été

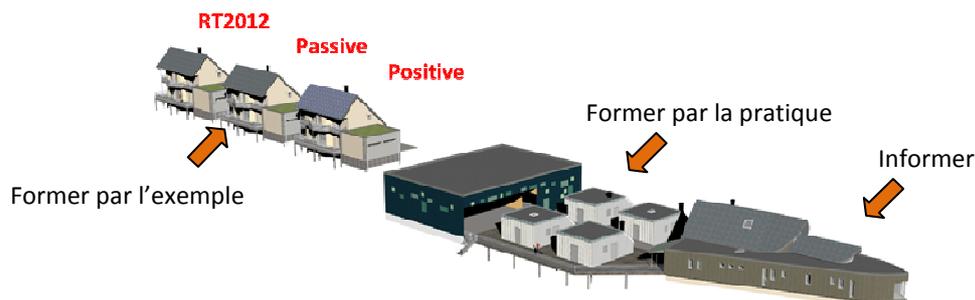


Fig. 1 : Vue d'ensemble du centre BOIS<sup>PE</sup>.

### Premiers retours sur les mesures de confort et de consommation

L'instrumentation des maisons est composée de trois ensembles :

- La mesure des consommations est réalisée poste par poste, sur la totalité des postes de consommation,
- La température et l'hygrométrie sont mesurées dans toutes les pièces de vie,
- Les profils de températures sur toutes les parois permettent d'évaluer l'impact des éléments porteurs en bois dans les épaisseurs d'isolant.

Inoccupées pour l'instant, les maisons sont chauffées et rafraichies pour conserver des conditions de confort. La corrélation directe entre les choix de pilotage, les valeurs de confort, et les consommations électriques sont mesurées en continu, en fonction de la qualité des enveloppes. Un exemple est donné Figure 2, où l'on peut suivre la température intérieure en fonction de la sollicitation extérieure et des actions de rafraîchissement par la ventilation mécanique, ou par la ventilation naturelle.

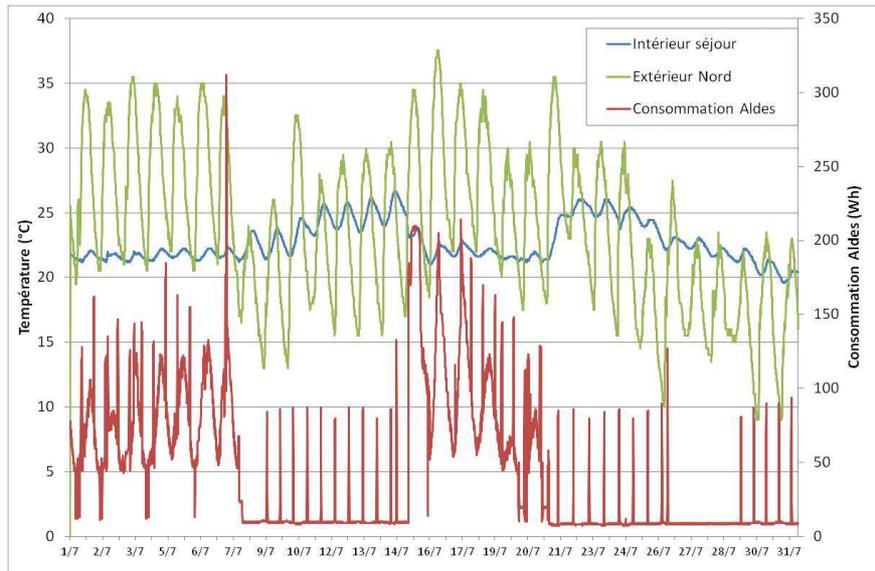


Fig. 2 : Maison passive – juillet 2015 : Effet du rafraîchissement artificiel, et de la ventilation naturelle

### Mesure de la Qualité de l’Air Intérieur

Ces mesures et analyses ont été réalisées dans le cadre du projet COVBAT-Bois <sup>(1)</sup>, grâce à un financement de l’ADEME. Des campagnes de mesures ont été réalisées aux principales étapes de construction des maisons, à la mise en route de la ventilation mécanique contrôlée, et après l’introduction du mobilier. Les concentrations sont présentées Figure 3, et permettent d’identifier l’origine des polluants selon les matériaux, et d’approcher les cinétiques de diffusion de ces produits

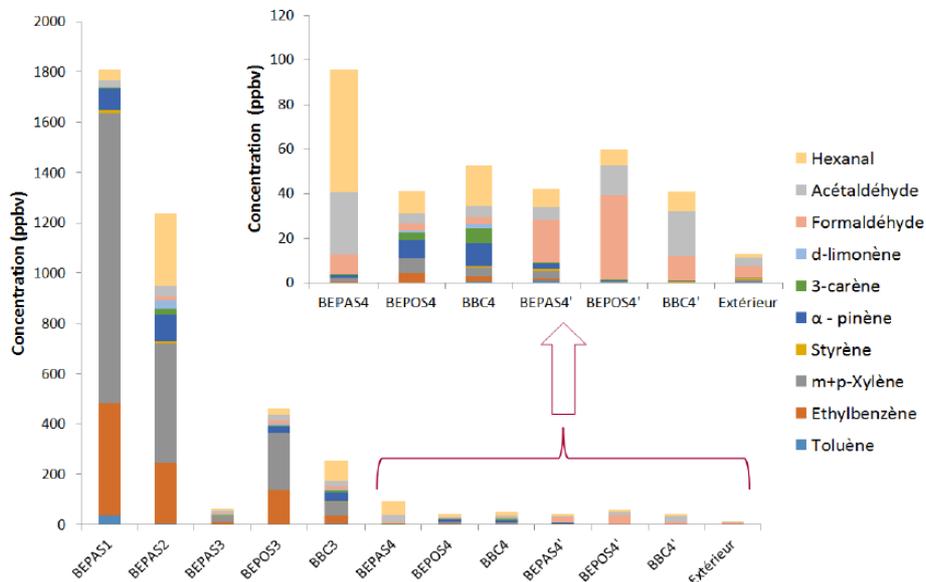


Fig. 3 : Histogrammes cumulés des concentrations en COV aux différents stades de construction

<sup>(1)</sup> Partenariat : Ecole des Mines d’Ales-C2MA (ARMINES), Latep (UPPA), ETHERA, BOIS<sup>PE</sup> (AVRUL / Université de Limoges)

B18

## Caractérisation des paramètres de fissuration à partir d'un essai de fendage par coin et la corrélation d'images numériques

JAMAAOUI Amine<sup>1</sup>, POP Octavian<sup>1</sup>, COSTA Guy<sup>2</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>1</sup>, GLOAGEN Vincent<sup>2</sup>, VALLE Valéry<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France

<sup>2</sup> Univ. Limoges, LCSN, UPRES EA 1069, F-87000 Limoges, France

<sup>2</sup> Univ. Poitiers, Pprime, PEM, CNRS UPR 3346, F-86000 Poitiers, France

[amine.jamaaoui@etu.unilim.fr](mailto:amine.jamaaoui@etu.unilim.fr)

**Mots clefs :** Fissuration, fendage par coin, corrélation d'images numériques, mode d'ouverture.

### Contexte scientifique

Les structures en bois ont largement démontré leur capacité à braver les siècles, mais ce privilège n'est pas donné à toutes. Dû au fait de sa nature fortement hétérogène, le matériau bois possède un réseau de micro et macro défauts dont des fissures préexistantes qui peuvent se développer sous l'effet de chargements mécaniques ou des conditions climatiques de l'environnement. Leur développement peut générer des conséquences pathologiques, et au-delà des conséquences esthétiques, cela peut également réduire la longévité de la structure ou même engendrer une instabilité de l'ouvrage. Dans ces circonstances, le développement des outils et des modèles appropriés s'avère nécessaire afin d'évaluer l'état structurelle des ouvrages. Une évaluation doit inclure un renforcement en termes de suivi des fissures pour mieux identifier et quantifier leurs risques sur l'ouvrage.

Au cours des dernières années, l'application des techniques optiques en mécanique de la rupture, pour l'analyse de champs cinématiques et l'identification des paramètres de rupture ne cesse de croître. Ils ont fait l'objet de nombreuses recherches. Dans la littérature, on distingue différentes méthodes. Dans le domaine du génie civil, la corrélation des images numériques et la méthode du suivi de marqueurs semblent appropriés pour caractériser les déplacements et déformations réelles en tout point de la surface. Ils offrent également la possibilité de générer un maillage éléments finis à partir des mesures expérimentales.

Cette étude se présente sous la forme d'une série de mesures expérimentales et analytiques mise en place pour évaluer les paramètres de rupture d'une éprouvette en bois, chargés en mode d'ouverture (mode I). Les champs de déplacements et de déformations seront évalués à partir des mesures de corrélation d'images numériques, et associés par la suite à une méthode d'optimisation afin de remédier aux erreurs des aux conditions de l'expérimentation.

### Protocole expérimental et démarches

Le comportement mécanique de l'éprouvette a été évalué à partir d'un essai de fendage par coin. La géométrie de l'échantillon et la mise en place de l'essai sont schématisées dans la Fig. 1. L'essai a été effectué en utilisant une presse électromécanique sous déplacement contrôlé. Pendant l'essai, la charge verticale appliquée, a été enregistrée moyennant une cellule de charge. En complément, les déformations de l'éprouvette seront évaluées à partir des mesures de corrélation d'images en utilisant une caméra CCD (Coupled Charge Device).

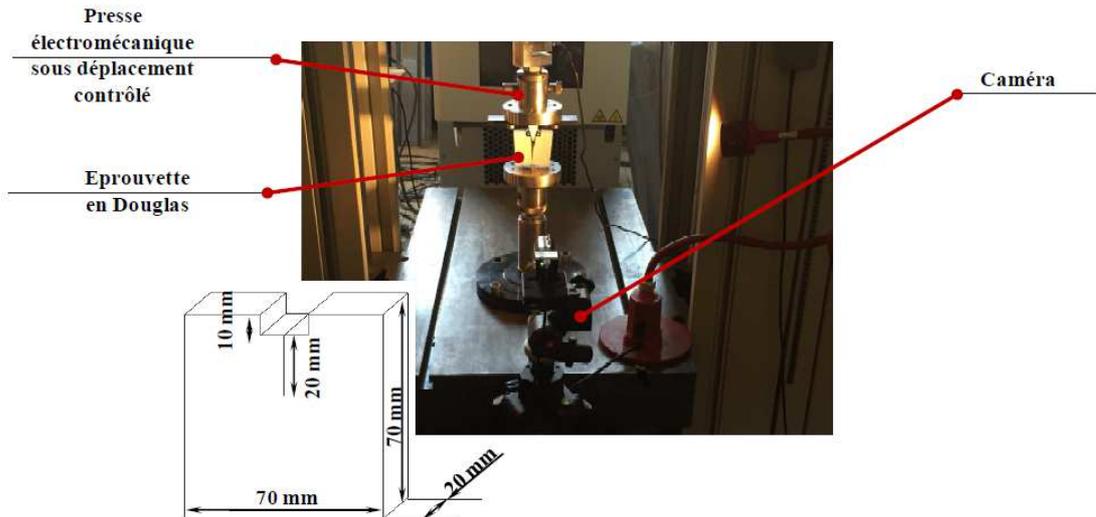


Fig. 1 : le Principe de l'essai de fendage par coin

Afin de surmonter l'effet des conditions d'incertitude des mesures expérimentales une procédure d'ajustement sera utilisée. Il s'agit de la méthode Newton Raphson itératif [Williams 1957 ; Méité et al 2013] qui consiste à minimiser l'écart entre les champs de déplacements expérimentaux et un champ analytique calculé à partir des séries de Williams via un algorithme de minimisation d'erreur au sens des moindres carrés. Cette procédure permet une évaluation simultanée des paramètres de mouvement du corps rigide et les coefficients de pondération de la série.

Dans la présente étude, la fissuration est caractérisée en utilisant une approche énergétique basée sur l'évaluation du taux de restitution d'énergie [Lanczos 1970] via l'intégrale J [Cherepanov 1979] et aussi une approche locale qui consiste à évaluer le facteur d'intensité d'ouverture de fissure [Dubois et al 2005; Méité et al 2013] à partir des champs de déplacements expérimentaux. Les deux approches nécessitent une connaissance des champs mécaniques, par conséquent le vecteur de déplacement est évalué expérimentalement avec la méthode de corrélation d'images, tandis que les contraintes et les déformations sont calculées à partir d'une approche par éléments finis.

## Références

- C. Lanczos (1970) The variational principles of mechanics, 4th edn. Dover Publications, New York.
- F. Dubois, C. Petit, (2005) Modelling of the crack growth initiation in viscoelastic media by the Gtheta integral, Engng Fract Mech 36 72 - 2821.
- G.P. Cherepanov, (1979) Mechanics of brittle fracture, McGraw-Hill, New York.
- M. Méité, O. Pop, F. Dubois, J. Absi, (2013) Characterization of mixed-mode fracture based on a complementary analysis by means of full-field optical and finite element approaches, International Journal of Fracture, 180 41-52.
- M. Williams, (1957) On the stress distribution at the base of a stationary crack, ASME Journal Applied Mechanics 24 109-114.

C01

## Le bois de douglas en images...

PLAZANET Idelette<sup>1</sup>, CAPITAINE Erwan<sup>2</sup>, MOINE Dorothee<sup>1</sup>, POLI Evelyne<sup>1</sup>,  
LHERNOULD Sabine<sup>1</sup>, COSTA Guy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Limoges, Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup>Université de Limoges, Xlim, UMR CNRS 7252, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

[idelette.plazanet@etu.unilim.fr](mailto:idelette.plazanet@etu.unilim.fr) / [guy.costa@unilim.fr](mailto:guy.costa@unilim.fr)

**Mots clefs :** Immunohistochimie, Lignines, Paroi, Polysaccharides, Spectroscopie infra-rouge, Spectroscopie Raman

### Résumé

Le bois est essentiellement formé de l'enchevêtrement tridimensionnel de polymères pariétaux issus de cellules végétales mortes. Il est ainsi composé de cellulose (40 à 50 % de la matière sèche du bois), de lignines (25 à 35 %), d'hémicelluloses (environ 25 %) et dans une moindre mesure de pectines, de protéines et d'extractibles. Ces molécules interagissent les unes avec les autres *via* de multiples liaisons chimiques inter et intramoléculaires (Plomion et al., 2001). Différentes techniques analytiques couplées à la microscopie permettent d'approcher la composition chimique du bois et d'observer la répartition de ces polymères au sein de la paroi. Nous présenterons dans ce poster une étude menée sur du bois de douglas sur lequel ont été investiguées plusieurs approches mettant en jeu des techniques de microscopie photonique ou confocale, en lumière visible, à fluorescence ou couplées aux spectroscopies Raman ou infra-rouge.

Les techniques d'analyse présentées ici ont l'avantage d'être non destructives tout en étant informatives. Leur utilisation sur du bois de douglas nous a permis d'obtenir des données complémentaires aux techniques ELISA à partir du bois solubilisé dans un liquide ionique. Nous avons ainsi pu obtenir des informations sur sa structure et sur la répartition de la lignine, de la cellulose et de certaines hémicelluloses et pectines au sein de ses parois. Avec l'exemple du bois de douglas, ce poster illustrera les potentialités et les limites de chacune de ces techniques d'analyse sur ce type de matériel biologique.

### Référence

Plomion C., Leprovost G., Stokes A. (2001) Wood Formation in Trees. *Plant Physiol.* 127, 1513-1523.

## Elaboration d'un matériau bioactif

KHALDI Zineb<sup>1</sup>, BESSE Claire<sup>1</sup>, OUK Tan-Sothéa<sup>1</sup>, ZERROUKI Rachida<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université de Limoges, Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup> Université du Québec à Trois-Rivières, Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosiques, , 3351 boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (QC) G9A 5H7 Canada  
[Zineb.khaldi@etu.unilim.fr](mailto:Zineb.khaldi@etu.unilim.fr)

**Mots clés :** fibres lignocellulosiques, pâte Kraft, Triclosan, antibactérien.

### Résumé

Le triclosan, ou 5-chloro-2-(2,4-dichlorophénoxy) phénol, est un composé de synthèse utilisé dans de nombreuses applications, en tant qu'agent antibactérien, antifongique ou encore comme agent de conservation. Mais cette molécule active, se dégrade dans l'eau, en réagissant avec le chlore libre, entraînant la formation de sous-produits classés dans la famille des perturbateurs endocriniens. Malgré ses propriétés antimicrobiennes reconnues, le triclosan constitue une source de pollution non négligeable, ayant d'importantes conséquences sur la santé humaine.

Dans le cadre de la valorisation de la biomasse, afin de limiter la bioaccumulation et la persistance du triclosan dans les effluents et pour répondre aux problèmes de biocontamination des surfaces, nous nous sommes intéressés au greffage covalent du triclosan sur des fibres lignocellulosiques de pâte à papier (Fig. 1). Pour cela, nous avons choisi la réaction de cycloaddition 1,3-dipolaire entre le triclosan propargylé et la pâte kraft azidée.

Afin de démontrer la conservation du potentiel bactéricide du triclosan, après sa fonctionnalisation et sa fixation sur les fibres lignocellulosiques, nous avons testé le support obtenu sur différentes souches bactériennes référencées (*S.aureus*, *P.aeruginosa*, *E.coli* et *B.cereus*). Des suspensions bactériennes ont été déposées sur le support et un dénombrement des bactéries après 24 heures a permis de mettre en évidence l'effet bactéricide de la pâte à papier greffée, avec des pourcentages d'inhibition de croissance variant de 43% à 99%.

Ce projet entre dans la thématique de l'élaboration de matériaux bioactifs à partir de fibres lignocellulosiques, en utilisant des méthodes respectueuses de l'environnement.

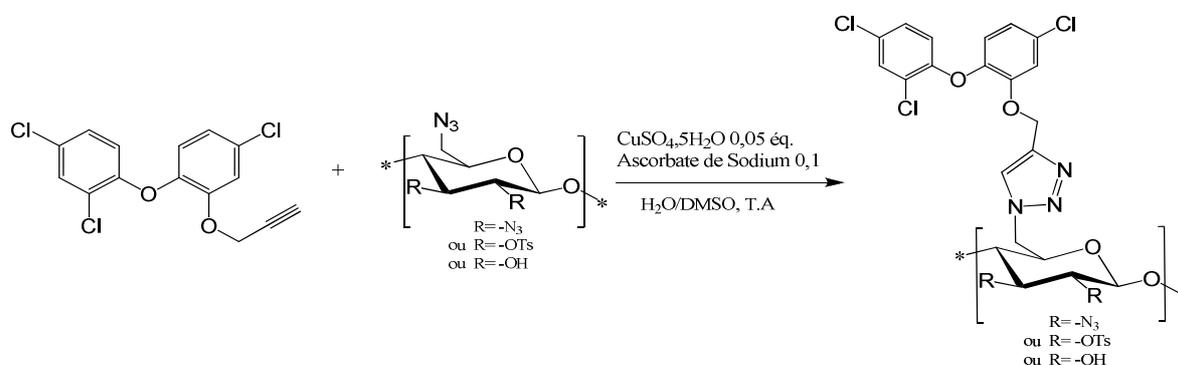


Fig. 1 : Stratégie de synthèse.

C03

## Étude de la variation intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et chimiques du Wamba (*Tessmania africana*) en provenance du Gabon.

MBAGOU Jean Bosco<sup>1</sup>, STEVANOVIC Tatjana<sup>1</sup>, FORTIN Yves<sup>1</sup>, EDOU ENGONGA Prosper<sup>2</sup>, IKOGOU Samuel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre de recherches sur les matériaux renouvelables (CRMR) Université Laval, Québec, Canada

<sup>2</sup>Ecole Normale Supérieure (ENS) Libreville Gabon  
[Jb\\_mbagou@yahoo.fr](mailto:Jb_mbagou@yahoo.fr)

**Mots clés :** Variation, Wamba, bois tropicaux, retrait, masse volumique, anisotropie.

### Introduction

Le bois présente une variabilité considérable qui se répercute sur les propriétés du bois. Mais cette notion est relativement connue au niveau interspécifique. La présente recherche a pour objet d'étudier la variation intra-arbre des propriétés physiques, mécaniques et chimiques du Wamba (*Tessmania africana*), une essence peu connue des forêts gabonaises.

### Matériels et méthodes

Le retrait, la masse volumique, le module d'élasticité ( $E_L$ ) et la contrainte maximale en compression longitudinale ont été déterminés sur la base de 360 éprouvettes suivant une adaptation des normes françaises. Les éprouvettes d'essai proviennent de deux arbres les plus représentatifs de l'espèce et prélevées à trois niveaux de hauteur et deux positions radiales (aubier vs duramen) dans le fût.

### Résultats et discussion

Les résultats contenus dans le tableau 1 montrent que la proportion des fibres, celle des vaisseaux, la magnitude des coefficients des retrait et de la masse volumique augmentent avec la hauteur notamment pour le bois de cœur.

Tableau 1: Variation des propriétés du bois avec la hauteur des troncs d'arbres

Haut	Fibres (%)	Vaisseaux (%)	$\beta_R$ (%)	$\beta_T$ (%)	$\beta_V$ (%)	$\beta_T / \beta_R$ (%)	$D_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_L$ (Gpa)	$\sigma_{maxc}$ (Mpa)	Extraits Totaux (%)
SCD	53,6	11,9	5,61	8,45	14,11	1,78	756	900	18,1	77,6	9,6
MTD	47,6	9,1	4,93	7,86	12,81	1,84	750	898	20,9	83,8	9,3
HPD	36,9	7,5	3,81	5,57	9,46	1,66	631	742	16,4	78,8	10,6
SCA	33,0	12	4,61	7,10	11,82	1,93	861	692	15,0	67,3	5,2
MTA	36,7	10,5	4,24	7,72	12,69	1,82	712	701	17,3	67,5	5,5
HPA	25,5	7,1	4,17	5,50	9,80	1,67	627	693	15,0	63,4	5,7

**SC :** Bois prélevés Sous la Cime; **MT :** Mi-hauteur; **HP :** Hauteur de Poitrine, **D :** duramen; **A :** Aubier ;  **$\beta_R$  :** retrait radial,  **$\beta_T$  :** Retrait Tangentiel,  **$\beta_V$  :** Retrait volumique ;  **$\beta_T / \beta_R$  :** anisotropie de retrait;  **$D_b$  :** masse volumique basale ;  **$D_0$  :** masse volumique anhydre ;  **$E_L$  :** module d'élasticité en compression ;  **$\sigma_{maxc}$  :** Contrainte maximale en compression.

Cette tendance est également observée pour la teneur en extraits totaux. Le test statistique effectué et présenté au tableau 2 révèle l'existence des relations significatives entre la proportion des fibres et les coefficients de retraits linéaires et volumiques et la masse volumique. Il en est de même entre le retrait et la masse volumique. La figure 1 illustre la variation du retrait volumique en fonction de masse volumique basale (duramen) suivant la

hauteur des troncs pour N= 90 échantillons. On observe que la masse volumique évaluée entre la mi-hauteur et le bois proche de la cime est significativement plus élevée que celle mesurée à hauteur de poitrine. Le tableau 1 indique également qu'en fonction de la hauteur du fût, au duramen, la teneur en extraits participerait également à la réduction du retrait. Plusieurs auteurs rapportent que les espèces à haute contenance en matières extractibles se caractérisent par de faibles coefficients de rétractabilité et de faibles valeurs du point de saturation de fibres [1]. Ce tableau révèle aussi que la quantité de matières extractibles diminue globalement au fur et à mesure que l'on s'approche de la cime de l'arbre [2].

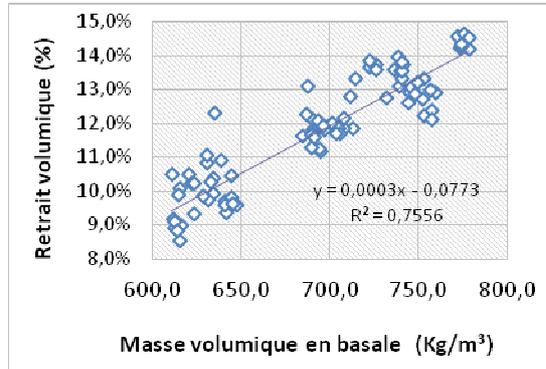


Figure 2: Relation entre le retrait volumique et la masse volumique suivant la hauteur des arbres.

Tableau 3: Corrélations de Spearman entre variables

Variation	% Fibres	% Vaisseaux	Db	D <sub>0</sub>
Db	0,78*	0,13	1	0,93**
D <sub>0</sub>	0,79*	0,13	0,93**	1
β <sub>T</sub>	0,71*	0,14	0,96**	0,92**
β <sub>R</sub>	0,48	0,38	0,62*	0,65*
β <sub>V</sub>	0,73*	0,17	0,94**	0,94**
β <sub>T</sub> /β <sub>R</sub>	NS	NS	NS	NS

\*\* significatif au seuil de 99% \* significatif à une probabilité de 95%. NS : non significatif.

Nos résultats sont semblables à ceux trouvés dans la littérature [3]. Ces auteurs ont rapporté que la variation de densité basale de quelques clones de peupliers euramericana augmentait suivant la hauteur. D'après Jozsa et Middleton, la production du bois mature se ferait de la base vers la cime vivante jusqu'à la souche et la proportion du bois juvénile dans la tige serait liée à la persistance du houppier et à une quantité d'hormone de croissance telle que l'auxine [4].

### Conclusion et perspective

Au regard de ce qui précède, on pourrait retenir que le bois de Wamba présente un retrait moyen et une masse volumique élevée. Son module d'élasticité serait proche de celui d'un bois tropical lourd alors que l'anisotropie de retrait est proche de l'unité et garantirait un séchage uniforme de ce bois qui est susceptible d'utilisation en structure.

### Références

- [1] Hernández, R, (2007). Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physico-mécaniques des bois tropicaux. Thèse de Ph.D, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, 186 P.
- [2] Stevanovic T.J. et D.Perrin, 2009. Chimie du bois. 1<sup>ère</sup> édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 241P.
- [3] Beaudoin, M., R.E. Hernández A. Koubaa, and J.Pouliquin. 1992. Intraclonal, interclonal, and variation in wood density of poplar hybrid clones. *Wood Fiber Sci.* 24 (2): 147-153.
- [4] Jozsa, L.A. et G.R. Middleton. 1994. *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Special Publication No. SP-34. Forintek Canada Corporation. Western Laboratory, Vancouver, Canada.

C04

## Dynamique intra-annuelle de la formation du bois et de la séquestration du carbone chez les résineux et feuillus des forêts tempérées

ANDRIANANTENAINA Anjy<sup>1</sup>, RATHGEBER Cyrille B. K.<sup>1</sup>, LONGDOZ Bernard<sup>2</sup>,  
FOURNIER Meriem<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup> LERFoB, UMR INRA - AgroParisTech 1092

<sup>2</sup> EEF, UMR INRA – Université de Lorraine 1137

<sup>3</sup> AgroParisTech, Centre de Nancy

[anandrianant@nancy.inra.fr](mailto:anandrianant@nancy.inra.fr)

**Mots clés :** *Fagus sylvatica*, Formation du bois, *Picea abies*, *Quercus petraea*, Séquestration du carbone.

### Résumé

Dû à l'accélération actuelle du changement climatique, les forêts tiennent un rôle essentiel dans le maintien du cycle du carbone, et particulièrement dans l'atténuation de ce changement par la séquestration du carbone dans le bois. Il est alors primordial de comprendre l'influence des facteurs environnementaux sur les processus à l'œuvre. Pour une meilleure connaissance de la dynamique intra-annuelle de la formation du bois et des flux de carbone dans un écosystème forestier, l'étude portera sur trois espèces: le hêtre, le chêne sessile et l'épicéa, sur trois sites historiques de tour à flux: Hesse et Barbeau (France) et Tharandt (Allemagne). Les travaux se focaliseront sur la réponse à la question : comment se coordonne la croissance et la production de biomasse (en quantité de carbone) pour différentes espèces ligneuses dans différents sites écologiques, en tenant compte de l'influence des facteurs climatiques. Les flux de carbone, de la capture au niveau des feuilles à la séquestration dans le bois, seront décrits à différentes échelles. Au niveau de l'écosystème, la tour à flux sur chaque site permettra de caractériser la dynamique des échanges nets de l'écosystème (NEE), et de la productivité primaire brute (GPP). Au niveau peuplements forestiers, la modélisation écophysologique permettra de calculer les stocks et flux de carbone et d'eau et de simuler le cours saisonnier de la productivité primaire nette (NPP). Au niveau arbre, des microcarottes seront analysées pour quantifier la dynamique saisonnière du carbone à l'aide des plateformes PTEF et Xylosciences. Pour suivre l'allocation de carbone à la croissance primaire et secondaire et la dynamique de la séquestration du carbone dans le bois, des mesures des carbones structurales et non structurales seront effectuées. L'influence des facteurs environnementaux seront également pris en considération par le suivi de la phénologie des feuilles et de la croissance des pousses, mais également de la composition isotopique du carbone ( $\delta^{13}C$ ). Un des principaux résultats sera la mise en évidence des relations : flux de carbone à l'échelle écosystème et formation du bois et séquestration du carbone à l'échelle arbre et la variabilité des processus selon les facteurs climatiques. L'originalité de ce travail réside ainsi dans la conciliation de plusieurs échelles, de l'arbre à l'écosystème. Il se situe également à l'interface de plusieurs grandes questions écologiques, et prévoit d'allier plusieurs disciplines pour y répondre.

### Références

DELPIERRE, Nicolas, VITASSE, Yann, CHUINE, Isabelle, GUILLEMOT, Joannès, BAZOT, Stéphane, RUTISHAUSER, This et RATHGEBER, Cyrille B. K. (2015). Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-015-0477-6.

MICHELOT, A., SIMARD, S., RATHGEBER, C., DUFRENE, E. et DAMESIN, C. (2012). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology*. Vol. 32, n° 8, pp. 1033-1045. DOI 10.1093/treephys/tps052.

STEPPE, Kathy, STERCK, Frank et DESLAURIERS, Annie (2015). Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology. *Trends in Plant Science*. Vol. 20, n° 6, pp 335-343. DOI 10.1016/j.tplants.2015.03.015.

ZEIN, R. El, MAILLARD, P., BREDA, N., MARCHAND, J., MONTPIED, P. et GERANT, D. (2011). Seasonal changes of C and N non-structural compounds in the stem sapwood of adult sessile oak and beech trees. *Tree Physiology*. Vol. 31, n° 8, pp. 843-854. DOI 10.1093/treephys/tpr074.

C05

## Analyse du mouvement résultant de la croissance d'un arbre à partir de données T-LiDAR : cas d'étude sur des perches de hêtre (*Fagus sylvatica* L.)

Noyer Estelle<sup>1,2</sup>, Constant Thiéry<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, 54000 Nancy, France

<sup>2</sup> INRA, UMR 1092 LERFOB, 54280 Champenoux, France  
[constant@nancy.inra.fr](mailto:constant@nancy.inra.fr)

**Mots clés :** Biomécanique, Courbure, Lidar terrestre

### Introduction

La forme d'un arbre est le résultat de son acclimatation à différents facteurs environnementaux tout au long de sa vie qui vont conditionner la qualité du bois produit.

Les principaux facteurs environnementaux sont la disponibilité en lumière pour assurer la fonction photosynthétique, et la croissance primaire des méristèmes apicaux qui conditionnent le développement de l'arbre. En complément de ce développement architectural, la croissance secondaire ou radiale génère un effet passif du point de vue mécanique lié à l'augmentation et à la répartition spatiale de la biomasse de l'arbre et à son déséquilibre..

Pour lutter contre les effets de la gravité, les arbres peuvent réagir en contrôlant activement leur posture en modifiant la nature et la quantité de bois produit par le cambium, du bois de réaction et de l'asymétrie de croissance dans les cernes de croissance respectivement. Ces différents mécanismes peuvent modifier la courbure de la ligne neutre des axes ligneux conduisant à leur redressement ou à leur affaissement (Coutand *et al.* 2007, Moulia et Fournier 2009).

### Matériel et Méthodes

La courbure est une variable difficile à mesurer avec précision sur le terrain par des moyens traditionnels et la mesure est alors très ponctuelle. Grâce au LiDAR terrestre (T-LiDAR), cette information est accessible rapidement et de manière beaucoup plus continue.

Ce poster présente la méthode utilisée dans une étude dont l'objectif général était d'étudier la capacité à réagir à l'ouverture du couvert de 42 perches de hêtre ( $7\text{cm} < D130 < 25\text{cm}$ ) ayant crûes pendant 60 ans en dessous d'arbres dominants. Deux profils longitudinaux de courbure de l'axe neutre d'une tige ont été comparés à partir de deux scans T-LiDAR séparés de 6 ans, en vue de localiser les positions où la courbure variait. Le premier scan a été réalisé au moment de la mise en place de l'éclaircie au cours de l'hiver 2007-2008, et le second durant l'hiver 2013-2014.

Ce calcul se base sur une série de cercles ajustés sur des clusters de points horizontaux représentant une rondelle de tronc d'une épaisseur paramétrée en l'occurrence à 10 cm de hauteur. Ensuite les centres des cercles appartenant à la portion de tronc dont on veut calculer la courbure servent à définir une polyligne qui est complétée artificiellement aux extrémités par une symétrie planaire de manière à garantir la dérivabilité sur toute la longueur considérée. Ensuite, pour chaque point de la polyligne, le vecteur tangent à la polyligne est obtenu par régression linéaire sur un nombre impair de points entourant le point considéré. Puis des dérivations vectorielles successives permettent d'établir le repère de Frenet-Serret duquel se déduit le cercle osculateur tangentant la ligne en 3D, et dont l'inverse du rayon est la courbure recherchée.

## Résultats

L'évolution de la courbure est alors disponible en fonction de la hauteur de l'arbre et les différences peuvent être quantifiées entre deux dates. Pour l'illustrer Fig.1 présente la comparaison pour un arbre n'ayant subi aucune éclaircie. Des changements de courbure sont mis en évidence en dessous de 10 mètres, au delà la différence de qualité du nuage de points attribuable à des scans réalisés avec une résolution moins forte en 2008 rend plus difficile l'interprétation. A la base la forme moins cylindrique induite par l'empatement rend plus difficile la comparaison et a été en partie purgée en dessous de 1 mètre de hauteur.

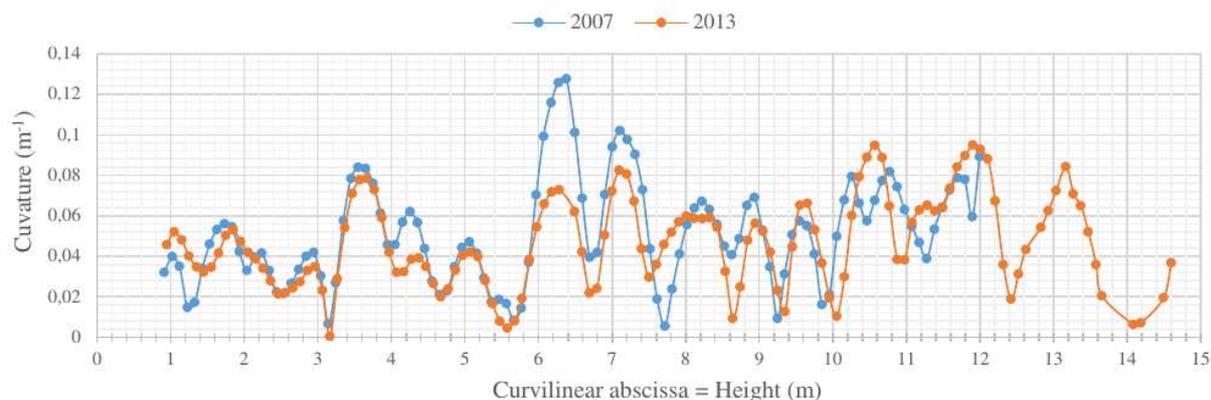


Fig. 1 : Exemple d'évolution temporelle du profil de courbure selon la hauteur d'une perche de hêtre entre 2008 et 2014.

## Références

Coutand, C., Fournier, M., & Moulia, B. (2007). The gravitropic response of poplar trunks: key roles of prestressed wood regulation and the relative kinetics of cambial growth versus wood maturation. *Plant Physiology*, 144, 1166–80.

Moulia, B., & Fournier, M. (2009). The power and control of gravitropic movements in plants: biomechanical and systems biology view. *Journal of experimental botany*, 60, 461–86.

## Analyse de la surface de bois rond pour la détection de défauts internes

NGUYEN Van-Tho<sup>1,2</sup>, CONSTANT Thiéry<sup>1,2</sup>, ELHARETH Dehane<sup>1,2</sup>, PIBOULE Alexandre<sup>3</sup>, COLIN Francis<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, 54000 Nancy, France

<sup>2</sup> INRA, UMR 1092 LERFOB, 54280 Champenoux, France

<sup>3</sup> ONF, RDI, 54000 Nancy, France

{vtnguyen,constant,colin}@nancy.inra.fr, dahane01@yahoo.fr, alexandre.piboule@onf.fr

**Mots clefs :** Lidar Terrestre, Tomographie Rayon X, Ecorce, Rugosité, Classement des bois

### Introduction

Dans le domaine forestier, la technologie LiDAR terrestre (Light Detection And Ranging) produit des images tridimensionnelles d'une parcelle de forêt ou d'arbres individuels avec beaucoup de détails et une grande précision. Ces images peuvent être utilisées pour estimer la biomasse, le volume de bois, mesurer la base de la couronne, l'inclinaison de la tige et classer les arbres [1]. Les données T-Lidar ont été peu utilisées pour évaluer la qualité du bois ou de l'arbre sur pied. En enregistrant la topologie de la surface du tronc, le LiDAR terrestre a permis de détecter et identifier différents défauts [2,3], d'évaluer la nodosité à partir des branches [4] ou d'estimer le volume de bois sans nœud à partir des cicatrices de branches [5].

L'objectif principal du projet est d'évaluer la qualité de bois ronds ou d'arbre sur pied. Dans une première étape nous développons un algorithme de détection de défauts internes en analysant la rugosité de la surface des billons. Les défauts que nous analysons sont les branches séquentielles ou leurs cicatrices sur l'écorce, les gourmands et les bourgeons dormants. L'algorithme est développé comme un plugin sous la plateforme Computree (<http://www.computree.onf.fr>).

### Matériel et Méthodes

Seize billons d'un mètre de long de différentes espèces ont été utilisés pour tester l'algorithme. Les données de ces billons font partie d'une base qui contient à la fois les données de T-LiDAR et de tomographie RX.

Notre approche pour identifier les zones susceptibles de correspondre aux défauts internes comprend 5 étapes. 1. Les axes principaux du nuage de points de la surface sont calculés pour travailler dans le système de coordonnées cylindriques. 2. On définit des bandes de 2,5 cm sur toute la longueur du billon. 3. Pour chaque bande, un polynôme de second ordre est ajusté selon la variation radiale par rapport à la position longitudinale des points. 4. Ce polynôme permet de définir une surface qui s'approche de la surface de la bande. 5. Lorsque la surface est calculée, la distribution statistique de la distance entre les points et cette surface peut être utilisée pour définir un seuil automatique qui permet de séparer les points en deux populations dont l'une appartient aux zones de défaut.

Nous avons utilisé les données de tomographie RX comme références pour valider nos résultats. D'abord les représentations du billon en données LiDAR et tomographiques sont superposées. Ensuite, les défauts internes correspondant à une zone détectée par l'algorithme sont repérés.

### Résultats

Nous présentons les résultats de huit billons et 4 espèces avec les meilleurs seuils trouvés. La proportion des zones détectées comme défauts sur l'ensemble de la surface (confirmées ou

non par les données tomographiques) est petite (Fig. 1). Les branches ont un taux de détection élevé, les gourmands qui sont moins fréquents et plus petits sont difficiles à détecter et enfin les bourgeons qui sont nombreux et très petits sont très difficiles à détecter (Fig. 2).

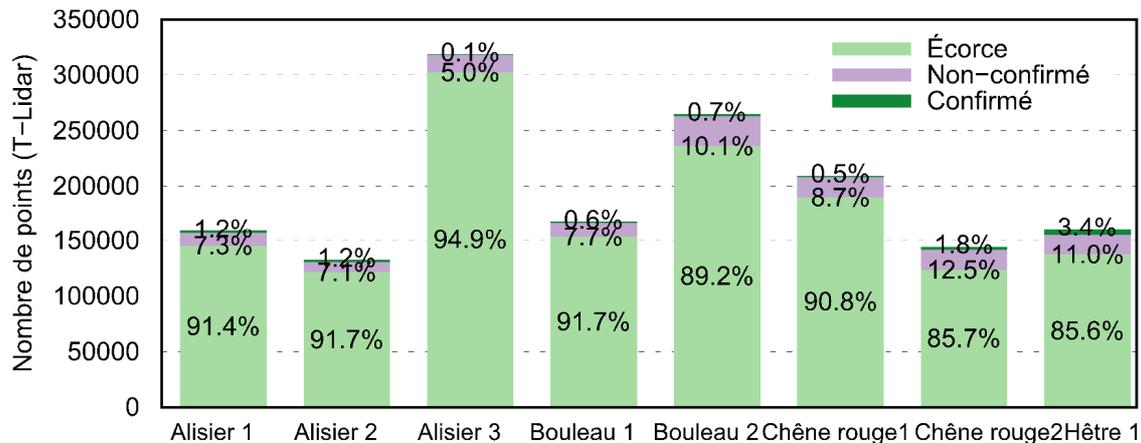


Fig. 1 : Pourcentage des régions confirmées et non-confirmées

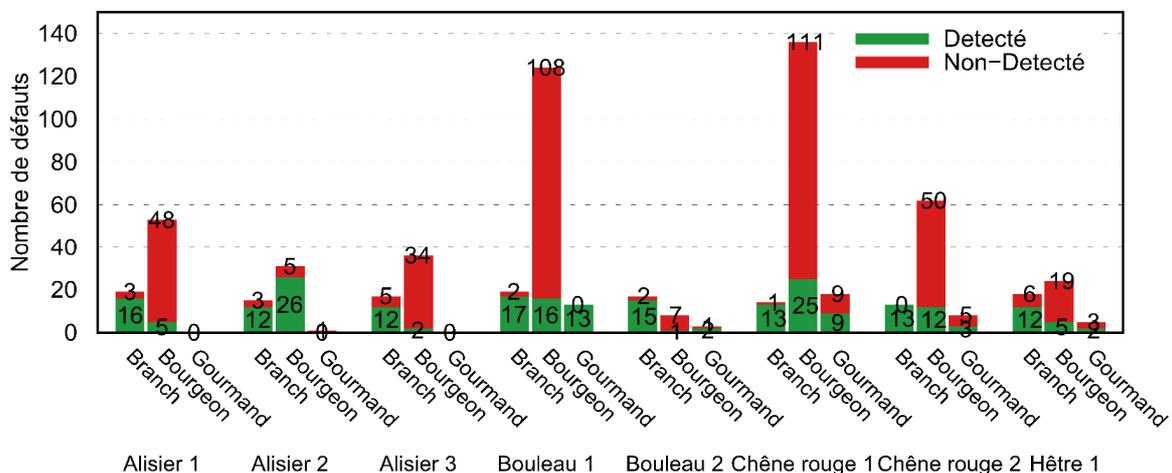


Fig. 2 : Taux de détection en fonction de type des défauts

## Références

- [1] Dassot, M., Constant T., and Fournier M. (2011) "The Use of Terrestrial LiDAR Technology in Forest Science: Application Fields, Benefits and Challenges." *Annals of Forest Science*, 1–16.
- [2] Schütt, C., et al (2004) "Approaches for Recognition of Wood Quality of Standing Trees Based on Terrestrial Laser Scanner Data." In *ISPRS*, 36: W2
- [3] Thomas, L, Thomas R.E. (2011) "A Graphical Automated Detection System to Locate Hardwood Log Surface Defects Using High-Resolution Three-Dimensional Laser Scan Data." In *Proceedings, 17th Central Hardwood Forest Conference*, Newtown Square, PA, USA., 92–101
- [4] Klemmt, H-J., et al. (2010) "Assessment of Branchiness in a Pinus Pinaster Plantation by Terrestrial Laser Scanner Data as a Link between Exterior and Interior Wood Properties." In *Proceedings of Silvilaser*, Freiburg
- [5] Stängle, S; M., et al. (2013) "Clear Wood Content in Standing Trees Predicted from Branch Scar Measurements with Terrestrial LiDAR and Verified with X-ray CT." *Canadian Journal of Forest Research*

C07

## Qualification, characterization and valorization of secondary quality beech from thinning

PURBA Citra Yanto Ciki<sup>1,3</sup>, RUELLE Julien<sup>1</sup>, MEAUSOONE Jean-Pierre<sup>2</sup>, OUDJENE Marc<sup>2</sup>, FOURNIER Meriem<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INRA, UMR 1092 LERFOB, 54280 Champenoux, France

<sup>2</sup>AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, 54000 Nancy, France

<sup>3</sup>Université de Lorraine, LERMAB 88026 Epinal, France

[cycpurba@nancy.inra.fr](mailto:cycpurba@nancy.inra.fr)

**Mots clefs:** Beech, Thinning, Surface roughness

### Introduction

French forests are dominated by hardwood which covers 71 % of its standing stock. In contrast, softwoods trees are more dominant in volume harvested and more widely used than hardwoods. Consequently, there is a paradox between the available resources with the resources used. Beech is one of the most important hardwood trees in France and even in Europe. While Beech standing stock in France is constantly increasing, the harvest is continuing to decline. Beech woods with high quality, derived from natural forests, are generally used as raw materials for furniture and veneer. Nevertheless, the new forest management system with silviculture intensive tends to produce low-quality wood. Moreover, any forests cannot produce "niche market" wood (furniture) without producing also a great amount of lower quality wood for pulp and paper or wood composite products. Timber for construction is then an intermediate product, which is more interesting for forest owners, with an increasing demand in markets. In European countries, timber for construction is dominated by softwood although hardwood commonly has better mechanical resistance than softwood. Hardwood is more heterogeneous making it difficult to adapt the existing grading standards. French policies recently declared that increasing the added value of hardwoods forest-wood chain by increasing their use in building industry is a priority.

Beech from the first thinning is generally used as bioenergy resources which has the lowest value. These small diameter woods can be engineered to form reconstituted wood by using adhesives to increase its value. But the difficulty of gluing high-density hardwoods is generally recognized. Since hardwoods commonly have thicker cell walls and smaller diameter lumens, adhesives do not easily penetrate into the wood, which is limiting mechanical interlock between wood and adhesives. Besides, some study showed lower strength in reconstituted wood compared with solid wood. Moreover, machined Beech has a very smooth surface. Poor surface roughness tends to form low bond durability since it has lower reaction area between wood and adhesives. In reverse, excessive roughness also induce weak bond durability. It is then necessary to define the factors affecting surface roughness in Beech prior to find the proper surface roughness to produce good bonding. From literature studies we found some potential factors such as density, grain figure, moisture content, diameters and distribution of vessels, early wood and latewood, and reaction wood (Aguilera and Zamora, 2009; Dünisch, 2013; Kilic et al., 2006; Thoma et al., 2015; Vitosytè et al., 2015).

### Objective

The objectives of this research are to participate in the improvement of wood bonding properties in beech by defining factors (structural parameters and properties at different

scales) that influence the behavior of machined beech wood during the bonding process and to valorize beech wood from first thinning which bring us to the individuals with small diameter.

### **Method**

The first part of the thesis will focus on the implementation the P-test tool to quickly assess surface roughness of wood through acoustic vibrations and to characterize the properties of beech wood from first thinning and by measuring the strength (MOE and MOR) and anatomical properties (density, micro density, quantitative anatomy, and x-ray diffraction to measure the MFA). This research will be conducted in LERFOB (Laboratoire d'Études des Ressources Forêt-Bois), INRA Champenoux, France and LERMAB (Laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois), Epinal, France.

### **Références**

Aguilera, A., Zamora, R. (2009) Surface roughness in sapwood and heartwood of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) machined in 90-0 direction. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 67, 297–301.

Dünisch, O. (2013) Relationship between the anatomical structure and the swelling of conditioned wood surfaces. *IAWA J.* 34, 197–208.

Kilic, M., Hiziroglu, S., Burdurlu, E. (2006). Effect of machining on surface roughness of wood. *Build. Environ.* 41, 1074–1078.

Thoma, H., Peri, L., Lato, E. (2015) Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. *Maderas Cienc. Tecnol.* 17, 285–292.

Vitosytė, J., Ukvalbergienė, K., Keturakis, G. (2015) Wood surface roughness: an impact of wood species, grain direction and grit size. *Mater. Sci.* 21, 255–259.

C08

## Effet de l'environnement sur l'analyse QTL de la ramification du chêne pédonculé

SONG Jialin<sup>1,2</sup>, BRENDEL Oliver<sup>3</sup>, BODENES Catherine<sup>4</sup>,  
KREMER Antoine<sup>4</sup>, COLIN Francis<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>INRA, UMR 1092, laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux, France

<sup>2</sup>AgroParisTech, UMR 1092, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), ENGREF, 14 rue Girardet, 54000 Nancy, France

<sup>3</sup>Laboratoire d'Ecologie et Ecophysiologie Forestières (EEF), UMR 1137 INRA / Université de Lorraine, Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux, France

<sup>4</sup>Laboratoire Biodiversité, Gènes et Communautés (BioGeCo), UMR 1202 INRA / université Bordeaux, centre INRA de Bordeaux, 33612 Cestas Cedex, France

[jialin.song@nancy.inra.fr](mailto:jialin.song@nancy.inra.fr), [colin@nancy.inra.fr](mailto:colin@nancy.inra.fr)

**Mots clefs :** branche séquentielle, épïcormiques, interaction Génotype\*Environnement, quantitative trait locus, *Quercus robur*

### Résumé

Une première analyse QTL de la ramification du chêne pédonculé menée à partir de données de tomographie à rayon-X a permis de repérer des QTLs correspondant aux traits suivants : nombre de bourgeons latents, nombre de gourmands et de branches (Song et al. 2013). La question s'est posée de savoir si ces QTL dépendaient ou non de l'expérimentation où l'étude avait été menée. L'effet de l'environnement semble être plus important que l'effet génétique pour les effectifs de bourgeons latents et des gourmands (Jensen JS 2000). L'objectif de l'étude a donc été de savoir si ces QTLs étaient stables d'un site à l'autre et aussi selon des méthodes de description différentes.

Une observation de la ramification a été réalisée sur une famille du chêne pédonculé de pleins frères dans deux sites. Les conditions environnementales (localisation, climat, âge de la plantation, densité de la plantation, aménagement) des deux sites sont très différentes. Les mesures ont été faites sur deux copies de 126 génotypes communs dans chaque plantation, l'effectif de différents types de ramification ayant été comptabilisé sur le tronc entre la hauteur de 0,9m à 1,9m.

Une analyse QTL multi-environnement a ensuite été menée sur la base d'une carte génétique comportant 686 marqueurs (Barreneche T et al. 1998). Parmi 39 QTLs détectés, 20 QTLs sont apparus significatifs au niveau du génome, 7 QTLs expliquant plus de 5% de la variabilité phénotypique dans les deux sites. La plupart de ces QTLs sont liés à la ramification épïcormique et à la proportion de bourgeons dormants s'étant développés en gourmands. L'effet des QTLs du nombre de gourmands a montré une nette différence entre deux sites. Au contraire, cette différence de l'effet des QTLs n'a pas été trouvée pour les effectifs de bourgeons. En comparant les positions des QTLs sur les chromosomes (ou groupes de liaison), des zones « hot-spot » ont été observées sur les groupes de liaison 2M, 6F, 7M, 8F.

Cette étude démontre que 1) les QTLs liés à la production des bourgeons dormants sont stables dans des environnements différents; 2) l'interaction génétique-environnement intervient sur le développement des gourmands. Puisque le génome de *Quercus robur* a été séquencé, une analyse bio-informatique pourra être réalisée sur les zones « hot-spot » afin de comprendre leurs fonctions génomiques.

## Références

Song J., Brendel O., Bodénès C., Kremer A., Colin F. (2013) Analyse QTL de la qualité du bois du chêne pédonculé, observée par tomographie à rayon X : Premiers résultats concernant les traces raméales. Poster GDR-bois

Jensen JS. (2000) Provenance variation in phenotypic traits in *Quercus robur* and *Quercus petraea* in Danish provenance trials. *Scand J For Res.* 15:297–308.

Barreneche T., Bodénès C., Lexer C., Trontin J-F., Fluch S., Streiff R., Plomion C., Roussel G., Steinkellner H., Burg K., Favre J-M., Glössl J., Kremer A. (1998) A genetic linkage map of *Quercus robur* L. (pedunculate oak) based on RAPD, SCAR, micro-satellite, minisatellite, isozyme and 5S rDNA markers. *Theor Appl Genet.* 97:1090–1103.

C09

## **Le projet EXECLIOR : raisonner la récolte de nos forêt dans le cadre d'une gestion durable de la fertilité des sols**

BILOT Nicolas<sup>1,2,3</sup>, SAINT-ANDRE Laurent<sup>1</sup>, FOURNIER Meriem<sup>2,3</sup>, DELEUZE Christine<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INRA, UR 1138 BEF, F-54280 Champenoux, France

<sup>2</sup> AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, 14 rue Girardet, F-54000 Nancy, France

<sup>3</sup> INRA, UMR 1092 LERFOB, route d'Amance, F-54280 Champenoux, France

<sup>4</sup> ONF R&D pôle de Dole, F-21100 Dole, France

nicolas.bilot@nany.inra.fr

**Mots clefs :** Récolte, biomasse, simulation, exportation minérale, fertilité

### **Contexte et objectif**

Dans le contexte énergétique actuel et futur, les pouvoirs publics s'engagent à réduire la consommation des énergies fossiles et à développer les énergies renouvelables afin de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> et de faire face à la raréfaction des sources d'énergie fossile. Un rapport ADEME de 2013 (Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 – Synthèse) vise 35% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique à l'horizon 2030. Pour le mix-chaleur, la biomasse sera la principale filière contributrice avec près de 45 %. Ces objectifs impliquent une augmentation de la récolte de bois : l'étude prospective de l'ADEME 2013 envisage une augmentation de 37 Mm<sup>3</sup>/an en 2030, atteignant un taux de prélèvement de l'accroissement biologique de 75%.

Pour récolter plus de bois, deux stratégies majeures sont possibles. D'une part l'augmentation de la production de bois (bois matériau et énergie), par exemple avec des itinéraires plus productifs, des changements d'essences, ou des cultures semi dédiées voire totalement dédiées pour la biomasse énergie (type TCR). D'autre part une mobilisation plus complète de la biomasse présente en forêt, usuellement restituée à l'écosystème (les rémanents : branches, cimes, menus-bois, souches).

Le projet EXECLIOR (Simulation des EXportations en ELéments minéraux et de leur Coûts pour raisonner les choix de Récolte dans le cadre d'une gestion durable de la fertilité des sols) est financé par l'INRA pour 3 ans dans le cadre de des conventions de recherche/développement. Le projet est porté en collaboration par l'Office Nationale des Forêts (ONF) et deux unités INRA : Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers (BEF) et le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFoB).

EXECLIOR se place comme une suite intégrée des travaux menés depuis 2 décennies sur les bilans [Entrées – Sorties] d'éléments minéraux en forêt par BEF et la modélisation de la croissance des arbres en peuplements menés par le LERFOB. Le projet développe une analyse systémique (bilans et flux d'énergie et de matière, outil de quantification, intégration des coûts) de toute la récolte en bois (bois d'œuvre, bois industrie et bois énergie, et non pas seulement les menus bois). Le but est de raisonner les itinéraires de gestion en termes de compromis acceptables entre production de biomasse et exportation de minéraux.

### **Démarche**

Le projet EXECLIOR bénéficie des avancées récentes réalisées sur les modèles de biomasse et de minéralomasse (= contenus en minéraux ; projet EMERGE terminé en 2013, impliquant notamment l'ONF, le BEF et le LERFoB), du travail de Master réalisé par Nicolas Bilot sur l'estimation du pouvoir calorifique des bois à partir de leur composition en éléments minéraux, et son travail de thèse dans lequel il a notamment construit une chaîne d'outils de

simulation implémentés sur la plateforme de modélisation forestière CAPSIS, connectés au modèle de croissance Fagacées pour le hêtre, permettant cette analyse systémique.

L'approche est typiquement de type bottom-up : l'évaluation des itinéraires repose sur les décisions sylvicoles, les décisions d'exploitation et l'organisation logistique de la mobilisation.

Des cadres applicatifs se font par la participation au projet RESPIRE (exportation de minéralomasse des menus bois et retours compensatoires – projet ADEME porté par L. Saint-André, impliquant l'ONF et s'appuyant sur le réseau MOS -Matière Organique du Sol- de 18 parcelles expérimentales en France sur chêne, hêtre et douglas). Il s'agit de quantifier les exportations sur les parcelles du réseau MOS et de les intégrer dans des modèles de bilans matière, énergie et coûts. La démarche de modélisation permettra de mettre en perspective les interventions d'exploitation sur l'ensemble de la révolution d'un peuplement, en particulier de raisonner les remédiations à cette échelle de temps. Les premiers calculs permettront ainsi d'évaluer les compensations sur les placettes avec restitution de cendres. En retour, les mesures sur le réseau MOS permettront de valider les connaissances et modèles d'évaluation de l'exportation des éléments minéraux et des conséquences sur le sol (flux et biodiversité) à moyen terme.

Le projet INSENSE (Indicateurs de sensibilité des écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse, projet ADEME, porté par L. Augusto INRA-TCEM impliquant BEF, LERFOB et ONF) formalisera des indicateurs de sensibilité pour donner des seuils d'impact en fonction de degrés de récolte selon les sols. Un enjeu scientifique sera ensuite de voir comment tenir compte de ces indicateurs dans le simulateur, en particulier avec des analyses de sensibilité sur des gradients de sols.

Enfin, pour compléter les jeux de données minéralomasse (variation entre sites pour une même essence, dues aux conditions de station, et dont l'amplitude est encore mal quantifiée à l'échelle nationale pour les essences majeures), le réseau MOS apportera une quantification de cette variation mais nous utiliserons également La M-POETE (Mobile - Platform for the Observations and the Experimentation In Terrestrial Ecosystems – gérée par BEF dans le cadre de l'infrastructure nationale ANAEE-France) pour suivre un grand nombre de chantiers d'exploitation en France (mesures de biomasse et de teneur en éléments minéraux dans les différents compartiments des arbres).

### **Résultats attendus**

- Un simulateur ergonomique pour les entrées et les sorties (à partir du prototype de recherche réalisé pendant la thèse de Nicolas Bilot précédent le projet), validé sur des données réalistes et étendu à quelques grandes essences (hêtre, chêne, douglas) en valorisant les modèles de croissance disponibles et le réseau MOS.
- Une bibliothèque de scénarios d'exploitation construits en interaction forte avec les experts exploitation de l'ONF et du FCBA.
- Une analyse de sensibilité sur les exportations en utilisant des gradients de sols (Réseau MOS, suivis de chantiers en France).
- Un réseau d'animation « énergie et exploitation », en réponse à une demande exprimée par les gestionnaires des directions territoriales ONF.
- Formation d'une compétence métier pour l'ONF (expertise amendements et récolte bois énergie)

C10

## Biodiversité interspécifique des extractibles nodaux

BENKEDER Zineb<sup>1,2</sup>, TOUHARI Nassim<sup>1,2</sup>, COLIN Francis<sup>1</sup>, DUMARCA Y Stéphane<sup>2</sup>,  
GERARDIN Philippe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lerfob, UMR 1092 AgroParisTech – INRA

<sup>2</sup>Lermab, EA USC Université de Lorraine – INRA

zineb.kebbi-benkeder@nancy.inra.fr

**Mots clefs :** Acétone, flavonoïdes, lignanes, nœuds, stilbènes, GST, *Trametes Versicolor*

### Résumé

Les nœuds constituent le principal défaut du matériau bois. Ils déprécient fortement la qualité du bois d'œuvre et sont aussi particulièrement indésirables dans les industries papetières. Cependant, il s'est avéré que les nœuds de plusieurs essences de bois d'industrie (sapin, épicéa, pins, mélèzes, hêtre, etc.) contiennent des quantités importantes de substances extractibles ayant des propriétés intéressantes pour des utilisations dans le domaine de la santé ou de l'agro-alimentaire.

L'échantillon comporte vingt-trois arbres pour lesquels le duramen et les nœuds ont été prélevés, broyés et extraits à l'aide de quatre solvants de polarité croissante : dichlorométhane, acétone, toluène/éthanol, eau. Les résultats mettent en évidence la richesse des nœuds comparés au duramen, particulièrement en composés phénoliques (lignanes, flavonoïdes, stilbènes). Par ailleurs, des tests avec les GST de *Trametes versicolor* ont été réalisés sur ces extraits. Les résultats montrent l'interaction des GST avec certains extraits riches en acide gallique et en flavonoïdes.

C11

## Bio-polymères d'acide lactique pour la modification chimique du bois

GROSSE Charlotte<sup>1</sup>, NOËL Marion<sup>1</sup>, GERARDIN Philippe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département Architecture, bois et génie civil, Haute école spécialisée Bernoise, Bienne, Suisse

<sup>2</sup> LERMaB, EA 4370, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70 239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France  
[charlotte.grosse@bfh.ch](mailto:charlotte.grosse@bfh.ch)

**Mots clés :** Acide lactique, Bio-polymères, Bois, Modification chimique

### Introduction

Promouvoir l'utilisation des matériaux naturels et le développement de produits bio-sourcés pour des applications industrielles est devenu une priorité. Le bois est ainsi au cœur de ces problématiques modernes. En plus d'être une ressource renouvelable, disponible et facilement usinable, le bois possède de bonnes propriétés mécaniques. Cependant, c'est un matériau sensible aux variations d'humidité du fait de sa composition chimique. Sa modification chimique est ainsi une approche permettant de réduire ses variations dimensionnelles et d'augmenter sa durabilité. La réactivité des groupements hydroxyles permet d'envisager des liaisons plus ou moins fortes avec des bio-polyester comme l'acide polylactique.

Le potentiel d'amélioration des propriétés du bois par modification chimique des parois cellulaires par des oligomères d'acide lactique (OLA) a déjà été rapporté (Noël et al., 2009a/b). L'imprégnation de hêtre massif (*Fagus sylvatica L.*) par les oligomères purs (sans dilution) est suivie d'un traitement thermique induisant la polymérisation *in-situ*. Le présent travail rapporte l'étude de l'influence de la durée et de la température de la phase de chauffage sur les propriétés suivantes: efficacité anti-gonflement (ASE), lessivage et durabilité. L'utilisation de l'anhydride maléique pour la compatibilisation entre les deux matériaux a également été considérée.

### Matériels et Méthodes

Des échantillons de hêtre (*Fagus sylvatica L.*) de dimensions 15 x 15 x 10 mm (R x T x L) ou 15 x 5 x 25 mm (RT x TR x L) sont utilisés pour les essais d'ASE et de durabilité respectivement, et amenés à l'état anhydre par séchage à 103°C jusqu'à masse constante.

L'imprégnation est effectuée sous vide à température ambiante selon le cycle suivant : vide 10 min (580 mmHg) puis pression atmosphérique 10 min. Les échantillons sont ensuite essuyés rapidement et placés dans une étuve ventilée. Le gain de masse résiduel (%) est calculé comme le rapport de la différence de masse entre les échantillons anhydres et imprégnés chauffés sur la masse anhydre. Le gonflement du bois est mesuré après imprégnation et chauffage, et considéré comme une indication directe de la pénétration du produit de traitement dans les parois cellulaires.

L'essai d'ASE consiste à plonger les échantillons traités dans l'eau. Leur masse est enregistrée régulièrement pendant l'essai, leurs dimensions sont mesurées au début et après stabilisation de la masse.

Le lessivage est mené selon les spécifications de la norme NF X 41-568 jusqu'à la cinquième période d'immersion. La perte de masse de produit (%) est calculée comme le rapport de la perte de masse de l'échantillon pendant lessivage sur la masse de produit contenue dans le bois avant lessivage.

L'essai de durabilité est mené selon une procédure accélérée en boîtes de Pétri par exposition des échantillons traités, lessivés et stérilisés aux rayons gamma à une culture fongique de *Coriolus versicolor* pendant 6 semaines. La perte de masse (%) est calculée comme le rapport de la perte de masse pendant l'essai sur la masse initiale traitée (masses sèches).

Les oligomères d'acide lactique (LA) sont obtenus par distillation d'acide lactique en solution aqueuse à 80% suivie d'un chauffage sous vide à 120°C pendant 2 heures. Dans le cas des oligomères additionnés d'anhydride maléique (MLA), la réaction de greffage entre les 2 composés est conduite selon Hwang et al. (2012) préalablement à l'imprégnation.

## Résultats

Le tableau 1 compile les résultats obtenus. Pour un taux d'imprégnation d'environ 70%, aucun gonflement n'apparaît avant le chauffage du bois, ce dernier permettant aux oligomères de pénétrer dans les parois surtout lorsque la température est modérée. A partir de 180°C, la pénétration des oligomères est fortement réduite mais induit toutefois une efficacité anti-gonflement significative, le meilleur résultat étant obtenu avec le traitement T8 qui permet vraisemblablement une bonne pénétration du traitement dans la structure du bois, couplée à une polymérisation *in-situ* plus prononcée.

Les valeurs de perte de masse par lessivage sont très faibles et laissent entrevoir une bonne stabilité du traitement. Les échantillons lessivés soumis à l'essai de durabilité ont de plus atteint la classe de durabilité 1 selon la norme EN 350 avec une perte de masse de 0.5% et 0.6% pour le traitement T3 (LA et MLA respectivement).

Dans tous les cas, les bénéfices attendus par le greffage préalable d'anhydride maléique sur les oligomères d'acide lactique sont inexistant.

Tab. 1 : Conditions de traitement et propriétés du bois traité

Trait.	Temp. (°C)	Durée (h)	Gonflement (%)		Lessivage (%)		ASE (%)	
			LA	MLA	LA	MLA	LA	MLA
T1	120	48	19,2	15,8	-6,3	-4,8	70,3	68,7
T2	140	48	20,4	19,7	-4,1	-3,4	67,8	61,7
T3	160	48	15,3	14,0	-1,2	-0,4	63,2	60,1
T4	180	48	5,4	4,8	-5,0	-4,8	65,2	65,9
T5	140	72	17,8	13,9	-	-	66,8	58,9
T6	140	96	14,9	10,4	-	-	51,7	50,1
T7	140	120	13,8	10,0	-	-	53,4	43,1
T8	140 + 160	48 + 48	20,2	16,7	-1,8	-	98,6	86,6

## Références

Hwang SW., Lee SB., Lee CK., Lee JY., Shim JK., Selke SEM., Soto-Valdez H., Matuana L., Rubino M., Auras R. (2012) Grafting of maleic anhydride on poly(L-lactic acid). Effects on physical and mechanical properties, *Polym. Testing*, 31, 333.

Noël M., Fredon E., Mougél E., Masson D., Masson E., Delmotte L. (2009a) Lactic acid/wood based composite material. Part 1: Synthesis and characterization, *Bioresour. Technol.*, 100, 4711.

Noël M., Mougél E., Fredon E., Masson D., Masson E. (2009b) Lactic acid/wood based composite material. Part 2: Physical and mechanical performance, *Bioresour. Technol.*, 100, 4717.

C12

## Impact de l'élevage en fût sur la production d'exsudats bactériens lors d'une fermentation malolactique d'un vin

BASTARD Alexandre<sup>1,2</sup>, LESNIAK Clément<sup>1,2</sup>, COELHO Christian<sup>1</sup>, GOUGEON Régis D<sup>1</sup>, WEIDMANN Stéphanie<sup>2</sup>, GUZZO Jean<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR A 02.102 PAM AgroSup Dijon, Université de Bourgogne, Equipe PAPC, Institut Universitaire de la Vigne et du Vin, rue Claude Ladrey, 21078 Dijon, France.

<sup>2</sup> UMR A 02.102 PAM AgroSup Dijon, Université de Bourgogne, Equipe Valmis, Institut Universitaire de la Vigne et du Vin, rue Claude Ladrey, 21078 Dijon, France.

[christian.coelho@u-bourgogne.fr](mailto:christian.coelho@u-bourgogne.fr)

**Mots clefs :** *Oenococcus oeni*, activité physiologique, biofilm, bois, exsudats bactériens

### Quand microbiologie et élevage en fut font bon ménage.

L'élevage en fût est une étape importante qui suit la vinification d'un vin rouge ou d'un vin blanc. Il permet premièrement une stabilisation chimique par l'apport d'une quantité infime d'oxygène au travers du fût et deuxièmement une complexification aromatique par l'apport de notes boisées et tanniques extraites par l'interaction bois/vin (Chatonnet 1995).

En Bourgogne, pendant cet élevage en fût, les bactéries *Oenococcus oeni* de type Gram + réalisent la fermentation malolactique en transformant l'acide malique en acide lactique indépendamment de leur localisation dans le fût. Habituellement, les bactéries sous forme planctoniques réalisent la fermentation malolactique. Cependant, il a récemment été mis en évidence, qu'à l'approche de la surface bois, les cellules peuvent adhérer et se développer en biofilm tout en exerçant leurs fonctionnalités métaboliques (Bastard et al 2015).

Le bois permettrait donc aux bactéries de développer un mode de vie bien particulier qui leur permettrait de s'adapter aux conditions de stress comme celui du vin (éthanol, pH acide) tout en maintenant leur activité fermentaire.

### Les exsudats bactériens, marqueurs de la physiologie bactérienne

Quatre souches bactériennes d'*Oenococcus oeni* ont été élevées dans un milieu de culture nutritif en présence ou en absence de copeaux de bois pour simuler un élevage en fût afin d'en récupérer les exsudats bactériens qui serviraient de ciment à l'organisation des bactéries en biofilm sur le support bois. Ce suivi a été réalisé au bout de 3, 7 et 15 jours, en triplicat.

Au terme de cette expérimentation, les copeaux de bois ont tout d'abord été observés au microscope à balayage électronique et caractérisés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode ATR. Ceci, en plus d'un dénombrement bactérien, nous a permis de valider la formation du biofilm à la surface du bois et de caractériser la nature chimique des liaisons engagées à la surface du bois.

Dans un deuxième temps, les exsudats des solutions surnageantes (sans les bactéries ni les copeaux de bois) ont été extraits à l'aide de d'une solution éthanolique acidifiée (Ibarburu et al 2007). Une poudre blanchâtre en fonction de la souche bactérienne, du mode de vie et du temps de culture a été récupérée et lyophilisée.

L'analyse chimique de ces exsudats par FTIR-ATR et chromatographie d'exclusion stérique a permis de retrouver une certaine similarité intra souche, de confirmer leur présence à la surface du support bois et de différencier très clairement le mode de vie planctonique du mode de vie sessile des bactéries.

Une analyse protéomique fine de ces exsudats est en cours afin de caractériser plus finement les constituants polypeptidiques/peptidiques responsables de cette distinction physiologique.

### **Références**

Chatonnet, P. Influence des procédés de tonnellerie et des conditions d'élevage sur la composition et la qualité des vins élevés en fûts de chêne. Université de Bordeaux II, 1995.

Bastard, A.; Coelho, C.; Gougeon, R. D.; Alexandre, H.; Briandet, R.; Cannette, A.; Weidmann, S.; Guzzo, J., publication submitted to *Frontiers* 2015.

Ibarburu, I.; Soria-Díaz, M. E.; Rodríguez-Carvajal, M. A.; Velasco, S. E.; Tejero-Mateo, P.; Gil-Serrano, A. M.; Irastorza, A.; Dueñas, M. T., Growth and exopolysaccharide production by *Oenococcus oeni* I4 and structural characterization of their EPSs. *Journal of Applied Microbiology* 2007, 103 (2), 477-486.

C13

## Comportement en flexion des panneaux aérés mixtes bois lamellé croisé / isolant

Lorenzo Franzoni<sup>1-2</sup>, Arthur Lebé<sup>1</sup>, Florent Lyon<sup>2</sup>, Gilles Foret<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier (ENPC/IFSTTAR/CNRS)

Université Paris – Est

<sup>2</sup> Centre scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

[lorenzo.franzoni@enpc.fr](mailto:lorenzo.franzoni@enpc.fr) , [arthur.lebee@enpc.fr](mailto:arthur.lebee@enpc.fr) , [gilles.foret@enpc.fr](mailto:gilles.foret@enpc.fr) , [florent.lyon@cstb.fr](mailto:florent.lyon@cstb.fr)

**Mots clés :** Planchers lamellés croisés, planchers alvéolés, flexion 4-points, modélisation

### Introduction

Dans le domaine de la construction bois, les panneaux en bois massif lamellés croisés (CLT – Cross Laminated Timber, Fig. 1) sont de plus en plus utilisés en tant que plancher ou toiture. Ils sont composés de plusieurs couches en bois empilées et collées de façon croisée, pour obtenir des bonnes propriétés mécaniques et hygrométriques dans les deux directions.



Fig. 1 : Panneau en bois lamellé croisé (CLT)

Un enjeu technologique en développement est d'enlever du bois des planchers CLT et le remplacer avec du matériau isolant (Fig. 2) afin de rendre les panneaux plus légers et plus performants acoustiquement et thermiquement. L'utilisation de ces nouveaux planchers est encore limitée, à cause d'une connaissance insuffisante de leur comportement mécanique en flexion.

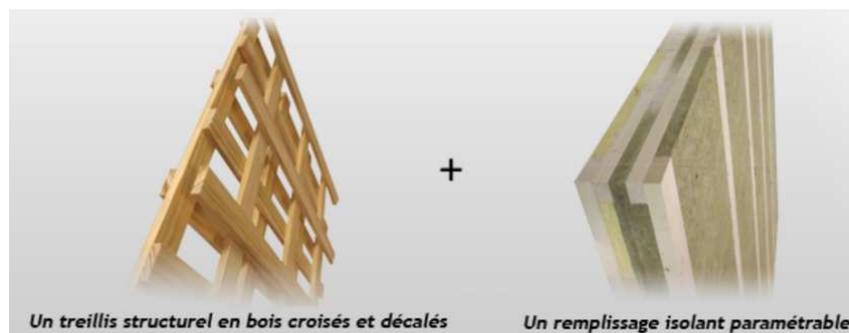


Fig. 2 : Concept du système Panobloc® pour produire des planchers en bois aérés

### Campagne d'essais

Des essais de flexion 4-points sur des planchers CLT massifs et aérés ont été conduits. Cette campagne essais a montrée l'augmentation des effets de cisaillement quand le pourcentage des vides augmente. En plus, le plancher le plus aéré a montré des modes de ruine complexes liées aux effets de cisaillement roulant (RT) et traction perpendiculaire aux fibres (Fig. 3) difficiles à prévoir avec les méthodes simplifiées des ingénieurs.

Ensuite, les planches en bois des planchers ont été testées pour déterminer les raideurs élastiques et les résistances. Les essais de caractérisation comprennent : traction parallèle aux fibres, compression selon les trois directions et cisaillement roulant.

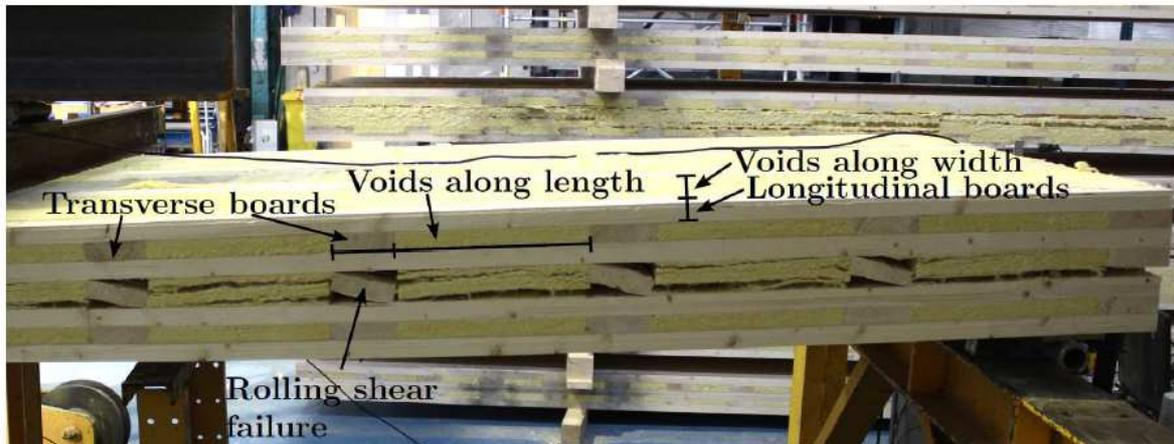


Fig. 3 : Rupture au cisaillement roulant dans les planches croisées

### Modélisation

Une première approche pour reproduire le comportement des planchers CLT aérés peut être celui d'utiliser des méthodes pour les CLT massifs et réduire les propriétés mécanique du bois issues des essais de caractérisation par le pourcentage du vide. Les deux méthodes pour le calcul en flexion choisies sont : la méthode d'analogie du cisaillement (Kreuzinger, 1999) adoptée par la norme allemande (DIN, 2004) et un modèle développé récemment qui combine une solution analytique 3D (Pagano, 1970) avec une couche CLT homogène équivalente (Franzoni et al, 2015).

Une modélisation plus avancée du comportement en flexion de ces panneaux très hétérogènes en bois est en cours. Le modèle choisi est un schéma d'homogénéisation périodique géré par une théorie de plaque pour les stratifiés (Lebé, 2012). À ce moment, seulement la raideur en flexion a été calculée avec cette méthode. Cette modélisation avancée permettra de déterminer les principaux paramètres pour concevoir ces nouveaux planchers aérés en bois, comme la raideur en flexion, la raideur en cisaillement, le chargement critique et le mode de ruine associé.

### Références

Deutsches Institut für Normung (2004) DIN 1052:2004 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin, Germany

Franzoni, L. Lebé, A. Lyon, F. Foret, G. (2015) Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies (submitted)

Kreuzinger H (1999) Platten, Scheiben und Schalen. Ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme (Allemand). Bauen mit Holz 1:34-39

Lebé A, Sab K (2012) Homogenization of thick periodic plates: Application of the Bending-Gradient plate theory to a folded core sandwich panel. International Journal of Solids and Structures 49:2778-2792

Pagano, N.J. (1970) Influence of shear coupling in cylindrical bending of anisotropic laminates. Journal of composite materials 4, 330-343

C14

## Réponse thermique de quatre essences de bois de construction soumises à un feu normalisé

LAHOUAR Mohamed Amine<sup>1,2</sup>, CARON Jean-François<sup>1</sup>, PINOTEAU Nicolas<sup>2</sup>

1 : Département Matériaux et Structures Architecturés, Laboratoire Navier, Ecole des ponts  
Adresse, 6-8 Avenue Blaise Pascal, 77455 Marne La vallée Cedex 2, France

[amine.lahouar@enpc.fr](mailto:amine.lahouar@enpc.fr) / [caron@enpc.fr](mailto:caron@enpc.fr)

2 : Département Sécurité Structure Feu, Laboratoire Fixations, Centre Scientifique et  
Technique du Bâtiment, 84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne

[nicolas.pinoteau@cstb.fr](mailto:nicolas.pinoteau@cstb.fr)

**Mots clés :** Bois, combustion, feu ISO, pyrolyse, transfert thermique ...

### Résumé

Le bois est le seul matériau naturel renouvelable. Il est écologique par nature et sa mise en œuvre nécessite très peu d'énergie par rapport aux matériaux de construction conventionnels (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2003). Ainsi, la construction bois participe activement au développement durable et à la préservation de l'environnement. (Sybois, 2011)

Dans le cadre de sa stratégie politique en matière d'environnement, le chef d'état a identifié, en 2013, la filière bois comme « filière d'avenir », afin d'encourager l'insertion du matériau bois dans la construction, ce qui explique l'expansion importante du secteur de construction bois. (CODIFAB, 2013)

Par ailleurs, de nombreuses réglementations relatives à la résistance au feu ont vu le jour, dont l'objectif est de sécuriser l'emploi de ce système constructif. (CNDB-RCS, 2007)

Les observations ont montré que l'exposition au feu d'une structure bois entraîne une déformation importante au niveau des connecteurs métalliques en affectant sa stabilité générale. D'où l'intérêt de noyer ces assemblages dans le bois afin de les protéger ! La solution consiste donc à assembler les éléments structurels en adoptant la technique des goujons scellés chimiquement dans le bois.

L'étude du comportement au feu de ce système d'assemblage nécessite donc la connaissance et la maîtrise des variations des propriétés thermophysiques du bois en fonction de la température.

L'étude bibliographique a montré qu'il existe plusieurs études menées sur ce sujet depuis le début de XX<sup>ème</sup> siècle (Kundson, 1975). La comparaison des résultats obtenus a montré que suite à la variabilité naturelle importante du bois, la généralisation des propriétés thermiques demeure difficile. (Laplanche, 2006)

Dans le cadre d'une thèse de doctorat entre l'ENPC et le CSTB sur la résistance au feu des goujons collés dans le bois, une étude de la propagation de la chaleur a été menée sur des bois soumis à un feu ISO 834-1. Les éprouvettes étaient sollicitées thermiquement sur une seule face avec différentes orientations des fibres.

Les essais ont été réalisés sur deux essences résineuses (épicéa (*Picea abies*) et pin maritime (*Pinus pinaster*)) et deux essences feuillues (chêne rouge (*Quercus robur L.*) et hêtre (*Fagus sylvatica L.*)). Ces essences sont largement répandues dans la construction bois.

Les éprouvettes étaient des cubes d'arête 20 cm. Elles présentaient un écart important de densités et de taux d'humidité. La propagation de la chaleur dans le bois a été suivie par le

biais de 5 thermocouples par éprouvette, installés à différentes distances de la face exposée au feu.

Les résultats des essais ont permis d'étudier l'impact de l'orientation des fibres sur la propagation de la chaleur et d'identifier les différentes phases de pyrolyse du bois.

Ces résultats ont été comparés aux résultats issus du modèle thermique par différences finies, développé pour calculer les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement. Les calculs ont été réalisés en exploitant les courbes de variation des propriétés thermiques du bois de l'Eurocode 5 partie 1-2 (Fig.1). Le taux d'humidité et la masse volumique initiale du bois ont été pris en compte.

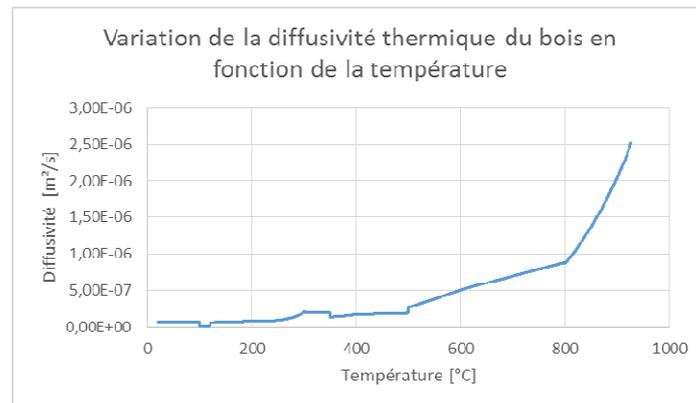


Figure 3: Variation de la diffusivité thermique du bois en fonction de la température

## Références

Comité National pour le Développement du Bois, la Fédération des industries forestières suédoise, CNDB-RCS (2007), Les essentiels du bois : Construction bois et sécurité incendie, Paris B 392 632 05.

Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois, CODIFAB (2013), Enquête nationale de la construction bois-Activité-2012.

Kundson, R.M., Performance of structural wood members exposed to fire (1975), s.l. Forest Product Journal, vol. 25. P23-32.

Laplanche, Karine. Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois : Approche expérimentale et modélisation. NNT:2006CLF21665, s.l. : Mechanical engineering, 2006, Vol. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. tel-00693999

Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Le bois matériau (2003), [Citation : 12 Juillet 2015.] <http://agriculture.gouv.fr/le-bois-materiau>.

SY l'enveloppe active de votre habitat, Pourquoi construire en bois, Sybois (2011), [Citation : 12 Juillet 2015.] <http://sybois.com/sy/pourquoi-construire-en-bois>.

C15

## Essais de compression *in-situ* dans la direction radiale des bois de printemps et d'été observés par microtomographie aux rayons X

BONNET Marie<sup>1</sup>, CARE Sabine<sup>1</sup>, BORNERT Michel<sup>1</sup>, AIMEDIEU Patrick<sup>1</sup>, KING Andrew<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France

<sup>2</sup>Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers Saint-Aubin, Gif-sur-Yvette, France  
[marie.bonnet@enpc.fr](mailto:marie.bonnet@enpc.fr)

**Mots clés :** Imagerie, Tomographie aux rayons X, Corrélation d'images, Compression, Bois d'été, Bois de printemps, Douglas

### Problématique

L'évolution de la microstructure sous contraintes (e.g. mécaniques ou environnementales) de matériaux tels que le bois, peut être observée en réalisant des essais *in-situ* au sein de systèmes d'imagerie. Parmi les techniques d'imagerie disponibles, la microtomographie aux rayons X permet une analyse tridimensionnelle à différentes échelles d'observation, en donnant accès à des résolutions usuelles allant de l'ordre du cm à l'ordre du  $\mu\text{m}$  (Fig. 1).

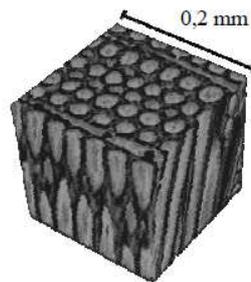


Fig. 1 : Microstructure 3D de Douglas obtenue par microtomographie aux rayons X au synchrotron SOLEIL

En couplant la microtomographie aux rayons X et la technique de corrélation d'images, il est ici proposé de mettre en évidence les mécanismes de déformation à l'échelle cellulaire du bois de printemps et du bois d'été, soumis à un essai de compression dans la direction radiale.

### Matériaux et méthodes

L'étude a été réalisée sur du Douglas âgé de 58 ans. Un effort particulier a été mis sur l'échantillonnage afin de limiter la variabilité entre les éprouvettes et de pouvoir comparer les résultats obtenus. Ainsi, l'ensemble des éprouvettes, de section de 1,7 mm<sup>2</sup> et de hauteur 3,4 mm, a été prélevé dans un seul cerne, situé au niveau de la transition entre le bois juvénile et le bois mature.

Les essais de compression *in-situ* ont été réalisés sous microtomographie aux rayons X sur la ligne Psiché du centre de rayonnement synchrotron SOLEIL à une résolution de 1,3  $\mu\text{m}$  dans les conditions de température et d'humidité de la ligne. 10 et 12 images respectivement ont été prises au cours de l'essai de compression du bois de printemps et du bois d'été.

Après reconstruction des images volumiques (logiciel PyHST2, ESRF), une analyse par corrélation d'images 3D a été effectuée (logiciel CMV3D, développé par Michel Bornert), qui a été suivie d'un post-traitement pour visualiser les champs de déplacement et de déformation (CAST3M, CEA).

## Résultats

Les courbes de compression mettent en évidence la différence de comportement mécanique entre le bois de printemps et le bois d'été (Fig. 2). Chaque relaxation observée sur la courbe correspond à un palier imposé pendant l'essai afin de scanner l'éprouvette.

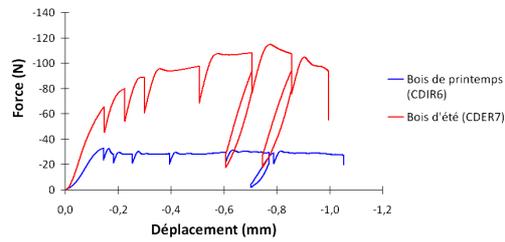


Fig. 2 : Courbes de compression des essais *in-situ*

Dans le cas du bois de printemps, l'analyse des images a permis notamment de mettre en évidence, dès le début du domaine plastique, une bande d'écrasement cellulaire (Fig. 3). Le flambement des rayons ligneux dans cette zone a aussi été observé (Fig. 4). L'apparition de ces endommagements dans la microstructure peut être corrélée à la perte de charge observée sur la courbe de compression.

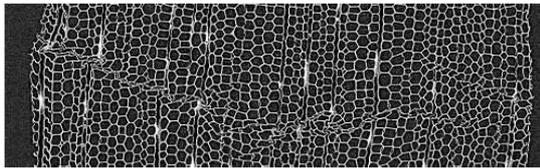


Fig. 3 : Visualisation du collapse des cellules dans le bois de printemps (palier n°2)



Fig. 4 : Flambement des rayons ligneux

Par ailleurs, la technique de corrélation d'images a pu être utilisée pour établir une cartographie des déformations à l'échelle des échantillons. Cette analyse sur l'éprouvette de bois d'été (Fig. 5) montre ainsi que des hétérogénéités telles que les canaux résinifères semblent avoir une influence notable sur la localisation de l'endommagement.

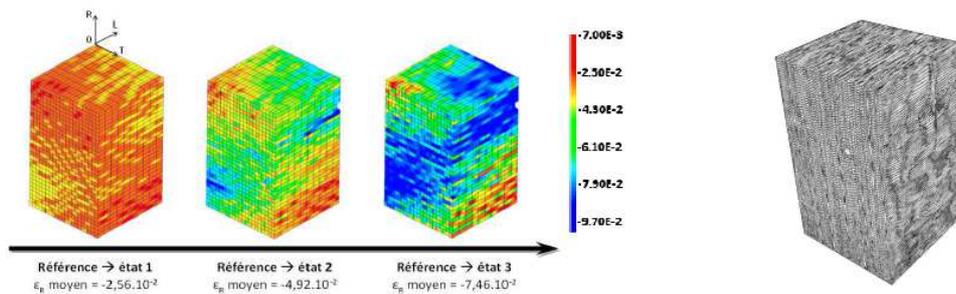


Fig. 5 : Evolution des déformations radiales de l'éprouvette de bois d'été et microstructure 3D à l'état initial

## Remerciements

Nous remercions tout particulièrement le centre de rayonnement synchrotron Soleil pour le temps de faisceau accordé sur la ligne Psiché et la disponibilité de son personnel. Nous remercions aussi l'INRA de Nancy, en particulier Julien Ruelle, LERFOB Nancy, de nous avoir fourni notre matériau d'étude. Enfin, nous remercions Cédric Montero, LMGC Montpellier, pour sa participation aux essais de microtomographie à Soleil.

C16

## Le flambement linéaire de plaque en lamellé-croisé par un modèle de plaque épaisse

PERRET Olivier<sup>1</sup>, DOUTHE Cyril<sup>1</sup>, LEBEE Arthur<sup>1</sup>, SAB Karam<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77455  
Marne-la-Vallée, France  
[olivier.perret@enpc.fr](mailto:olivier.perret@enpc.fr)

**Mots clefs :** Bending-Gradient, Flambement linéaire, Lamellé Croisé, Théorie de plaques épaisses

### Introduction

Les panneaux en lamellé-croisé sont des panneaux multicouches en bois dont les plis sont alternativement croisés à 90° et collés sur leurs faces supérieures et inférieures (cf Fig 1). Depuis 20 ans, les bâtiments en lamellé-croisé ont gagné en popularité du fait de leur légèreté, de la rapidité et de la facilité de leur mise en œuvre et de leurs qualités environnementales. Utilisés comme murs porteurs et donc soumis à un chargement dans le plan, ces panneaux, bien que relativement épais, sont susceptibles de flamber avant la rupture du matériau. En effet, la très grande souplesse en cisaillement roulant (cisaillement radial-tangentiel) mise en jeu dans les couches croisées a une forte influence sur la charge critique et peut donc conduire à un flambement prématuré.

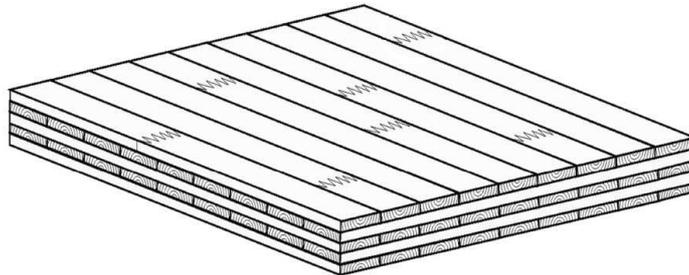


Fig. 1 : Panneau en bois lamellé croisé

Il est donc important de pouvoir prévoir la charge critique de flambement des panneaux en lamellé-croisé. Pour cela, la théorie de plaques épaisses du Bending-Gradient proposée par Arthur Lebé et Karam Sab (2011) a été étendue au flambement linéaire. Cette théorie est une généralisation du modèle de Reissner-Mindlin aux plaques hétérogènes qui donne une meilleure description du cisaillement transverse en introduisant 4 variables supplémentaires.

### Les différents modèles

Plusieurs modèles de plaque sont comparés dans cette étude : le modèle de Kirchhoff-Love où les effets de cisaillement sont négligés s'approchant ainsi de la théorie utilisée dans l'Eurocode 5 ; le modèle de Reissner-Mindlin, la théorie la plus simple prenant en compte les effets de cisaillement ; le modèle du Bending-Gradient qui considère la flexion, la torsion et le gauchissement dans la description du cisaillement transverse de la plaque. 2 projections du Bending-Gradient sur un modèle plus simple de Reissner-Mindlin ont également été considérées. Finalement, une modélisation 3D par éléments finis sert de référence par rapport aux résultats analytiques.

L'étude de flambement est réalisée pour des géométries variables correspondant aux configurations de lamellé-croisé standards.

### Comparaison entre résultats analytiques et résultats de référence

Les résultats obtenus (cf Fig. 2) nous permettent de faire les remarques suivantes dans le cas de plaques multicouches rectangulaires en bois lamellé-croisé :

- les charges critiques de voilement sont du même ordre de grandeur que la rupture en compression : le dimensionnement au voilement est donc une nécessité ;
- la théorie du Bending-Gradient donne des résultats très précis contrairement au modèle de Kirchhoff et à la théorie de déformation de cisaillement du premier ordre (utilisant le modèle de Reissner-Mindlin). La simple prise en compte des effets de cisaillement n'est pas suffisante pour décrire le modèle : il est nécessaire de considérer un modèle plus avancé notamment en prenant en compte les gauchissements ;
- l'une des projections du Bending-Gradient sur un modèle de Reissner-Mindlin donne des résultats très précis et pourrait être utilisé pour modéliser le flambement de plaques épaisses multicouches sans introduire la totalité des variables présentes dans le modèle du Bending-Gradient.

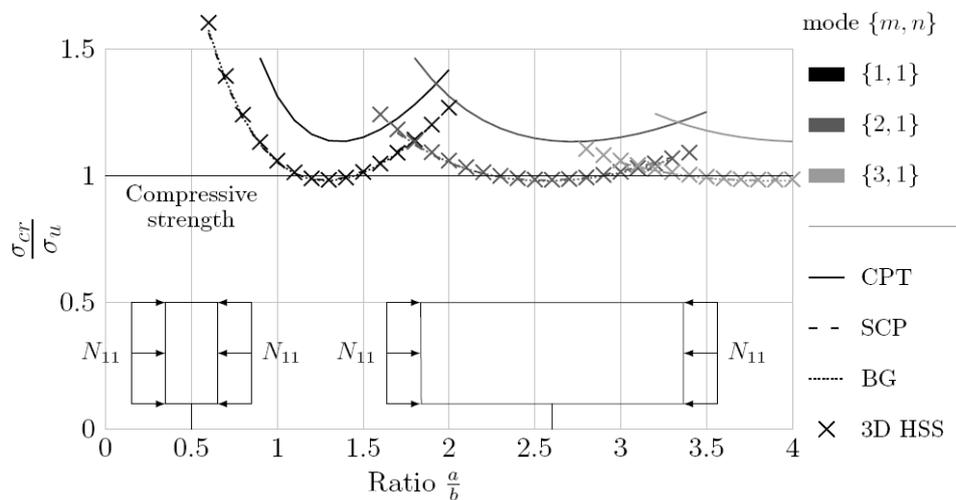


Fig. 2 : Rapport entre charge critique de flambement et rupture en compression pour un lamellé-croisé 5-plis avec un élancement  $b/h=15$

Cette étude est limitée au cas parfait qui n'est pas représentatif d'un panneau réel. Pour une meilleure modélisation du problème, il est envisagé d'une part de prendre en compte l'effet des imperfections comme l'excentrement de la charge et les défauts de planéité du panneau et d'autre part d'introduire les effets du comportement différé du bois. En effet, le bois est un matériau qui évolue dans le temps par fluage, phénomène qui accentue les imperfections initiales et peut donc conduire à une instabilité différée.

### Référence

Perret, O. Lebé, A. Douthe, C. Sab K. (2015) The Bending-Gradient theory for the linear buckling of thick plates: Application to Cross-Laminated-Timber Panels. *Submitted*

C17

## **Caractérisation des transferts massiques en régime transitoire de matériaux hygroscopiques à double échelle de porosité : mise en évidence du non-équilibre local**

CHALLANSONNEX Arnaud<sup>1</sup>, PIERRE Floran<sup>1</sup>, PERRE Patrick<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LGPM, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Grande Voie des Vignes, Châtenay-Malabry, France

[arnaudchallannex@gmail.com](mailto:arnaudchallannex@gmail.com)

**Mots clefs :** bâtiments écologiques, double échelle de porosité, identification, matériaux hygroscopiques, transferts massiques

### **Résumé**

Le secteur du bâtiment est dans notre pays le plus gros consommateur d'énergie et demeure très polluant. La situation environnementale actuelle nous invite donc naturellement à diminuer nos consommations énergétiques et à nous tourner vers l'utilisation de matériaux renouvelables. A ce titre, les matériaux biosourcés tirent leur épingle du jeu en permettant une large gamme d'usages tout en respectant l'environnement. Concernant l'isolation des bâtiments les panneaux de fibres végétales offrent de bonnes performances énergétiques pour un prix de revient modeste ce qui en fait certainement des matériaux d'avenir. Malheureusement, pour ces matériaux la lenteur des transferts massiques au sein des fibres est telle que la constante de temps associée au transfert microscopique est comparable à la constante de temps macroscopique de la paroi. Dans les parois d'un bâtiment, les alternances jour/nuit conduisent alors à des situations de non-équilibre local, même avec des épaisseurs de plusieurs centimètres. L'objectif de ce travail est de caractériser les transferts massiques en régime transitoire de ces matériaux tout en tenant compte du non-équilibre local.

En se basant sur ce qui a déjà été fait au laboratoire Perré et al. (2015) nous avons réalisé un nouveau dispositif permettant cette caractérisation. Le principe est de soumettre des échantillons à un échelon d'humidité relative puis de prélever deux variables indépendantes au cours du temps, l'humidité relative en face arrière de l'échantillon et sa masse. Ce dispositif (Fig.1), est réalisé autour d'un robot « peseur d'échantillons » permettant de mesurer la masse des échantillons à intervalles de temps réguliers. Il peut supporter jusqu'à dix échantillons et est placé dans une chambre climatique dont les conditions hygrothermiques sont contrôlées. Les échantillons sont placés dans des supports semblables à ceux utilisés par Perré et al. (2015), l'acquisition de l'humidité relative en face arrière de l'échantillon (exemple de résultat visible Fig.2) se faisant au moment de la pesée. Le dispositif et les différentes techniques expérimentales que nous avons mises en œuvre seront décrites plus en détail sur le poster.

Les tous premiers essais réalisés sur des échantillons de panneaux de fibres et de bois massif valident le fonctionnement du dispositif et mettent bien en évidence le non-équilibre local dans les transferts de masse en régime transitoire (cas du panneau de fibres).

### **Référence**

Perré, P.;Pierre, F;Casalinho, J.;Ayouz, M. (2015). Determination of the Mass Diffusion Coefficient Based on the Relative Humidity Measured at the Back Face of the Sample During Unsteady Regimes, International Journal of Heat and Mass Transfer



Fig. 1 : Dispositif expérimental

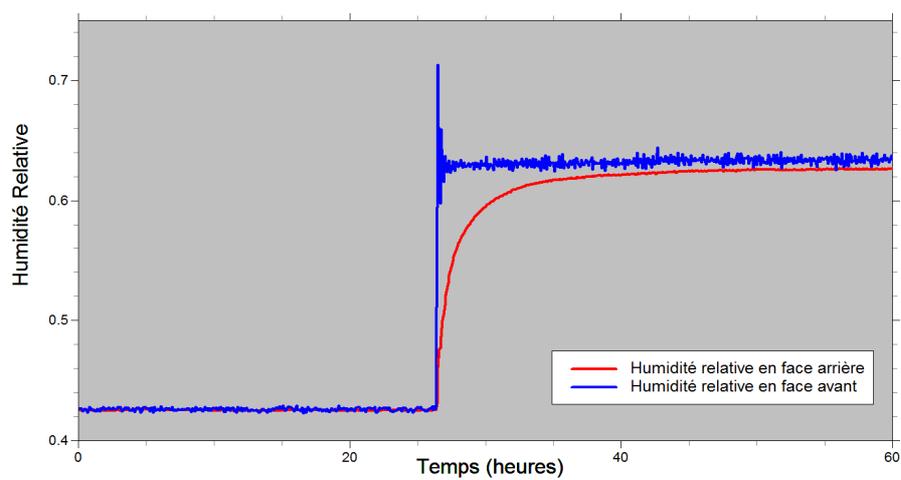


Fig. 2 : Evolution de l'humidité relative en face avant et arrière pour un échantillon de LDF

C18

## Calcul de la diffusion thermique équivalente d'un milieu 3D hétérogène par la méthode Lattice Boltzmann

LOUËRAT Mathilde, AYOUZ Mehdi, PERRÉ Patrick

Laboratoire de génie des procédés et matériaux (LGPM), CentraleSupélec,  
Université Paris- Saclay  
[mathilde.louerat@centralesupelec.fr](mailto:mathilde.louerat@centralesupelec.fr)

**Mots clefs :** Couplage chaleur/masse, diffusion thermique, matériaux biosourcés, méthode Lattice Boltzmann, milieux poreux, morphologie

### Résumé

Avec la performance thermique croissante des bâtiments et le recours à des matériaux biosourcés qui sont hygroscopiques (ce qui signifie que leur teneur en eau s'équilibre avec l'air humide ambiant), il est maintenant admis que les codes de thermique du bâtiment doivent prendre en considération les transferts couplés de chaleur et de masse ainsi que les changements de phases induits par ces transferts. L'objectif du projet de recherche repose sur trois axes : (i) la description de la morphologie 3D de matériaux par microtomographie aux rayons X et traitement d'images, (ii) le développement d'un code Lattice Boltzmann [Succi (2001)] 3D pour prédire leurs propriétés de transfert macroscopiques et (iii) la validation de ce code par mesure de diffusion massique sur différents échantillons (bois massifs et panneaux de fibres de bois de différentes densités).

La méthode numérique choisie pour réaliser le couplage chaleur/ masse est la méthode Lattice Boltzmann car elle est simple à implémenter et à paralléliser et qu'elle a la capacité d'intégrer des morphologies complexes et différentes [Ayouz (2013)].

Dans le travail présenté, un code Lattice Boltzmann 3D développé en interne est validé dans le cas simple d'un cube divisé en deux sous-domaines (cas série et parallèle) auxquels sont attribuées deux conductivités thermiques différentes. Les profils de température et les flux de chaleur obtenus sont en accord avec la solution analytique. Le code validé est ensuite utilisé pour déterminer la conductivité thermique équivalente d'un panneau de fibres de bois. La morphologie réelle présentée a été obtenue par microtomographie aux rayons X (scans réalisés par l'entreprise Novitom à l'ESRF).

Ces résultats représentent un premier pas dans la détermination des propriétés de transfert de matériaux biosourcés poreux. Le code devra être complété pour modéliser les transferts de masse et le couplage chaleur/masse. Les propriétés macroscopiques de plusieurs matériaux pourront alors être déterminées : épicea, chêne et panneaux de fibres de bois. Celles-ci seront ensuite validées par des mesures expérimentales.

### Références

Ayouz, M., Perré, P. (2013) Numerical simulation of diffusion in porous media using the Lattice Boltzmann Method. Eurodrying, Paris.

Succi, S. (2001) The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond. Clarendon Press, Oxford.

C19

## **Evaluation des propriétés physico-mécaniques des finitions extérieures pour bois : test de dureté Persoz vs test de traction.**

MALASSENET Lise, PODGORSKI Laurence, LANVIN Jean-Denis

Institut technologique FCBA, Allée de Boutaut, 33000 Bordeaux, France

[lise.malassenet@fcba.fr](mailto:lise.malassenet@fcba.fr)

**Mots clefs :** bois, finition, dureté, traction, vieillissement.

### **Introduction**

Le test de dureté Persoz consiste à déterminer la durée d'oscillation d'un pendule reposant par l'intermédiaire de deux billes sur la surface à tester. La dureté Persoz correspond alors au temps d'amortissement du pendule exprimé en secondes. Elle est d'autant plus faible que l'enfoncement de la bille est important. Malassenet *et al.* (2014, 2015) ont montré que le pendule de Persoz est un outil simple et non destructif permettant d'évaluer les performances au vieillissement des finitions extérieures directement appliquées sur bois. Ainsi une finition performante présente une faible dureté Persoz (inférieure à 60 secondes) qui varie peu sous l'influence du vieillissement. Afin de renforcer la pertinence d'utiliser le pendule de Persoz comme moyen non destructif d'évaluation des propriétés mécaniques des finitions, nous avons couplé les mesures de dureté avec des tests de traction habituellement utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux.

### **Objectif**

L'objectif de ce travail est de comparer les informations issues de la mesure de dureté Persoz de finitions appliquées sur bois avec le module d'Young et la déformation à la rupture fournis par des tests de traction sur films libres des mêmes finitions.

### **Méthode et Matériel**

Le pendule de Persoz est constitué d'un cadre muni de deux billes en acier qui reposent sur la finition à tester. Le test s'inspire de la norme NF EN ISO 1522 (2007), la dureté Persoz est exprimée en secondes. Des mesures de dureté Persoz ont été réalisées sur 11 formulations acryliques appliquées en épaisseur suffisante sur pin sylvestre, à raison de 12 mesures par formulation. Les tests de traction ont été exécutés à l'aide d'un vérin et d'une cellule de force de 100 N sur des films libres réalisés avec les 11 formulations acryliques. La distance entre les mors était fixée à 50 mm. La vitesse de déplacement du vérin était de 10 mm/min. Le module d'Young a été calculé comme la pente de la partie élastique de la courbe de contrainte en fonction de la déformation. La déformation à la rupture correspond à la déformation enregistrée au moment de la rupture. Les valeurs de module d'Young et de déformation à la rupture sont la moyenne de 5 tests par formulation.

### **Résultats**

Les résultats de dureté Persoz moyenne des 11 formulations sur bois sont représentés sur la Fig. 1 en fonction du module d'Young moyen et de la déformation à la rupture moyenne des films libres de ces mêmes formulations. On observe que la dureté Persoz augmente avec le module d'Young. Cela est cohérent avec le fait que plus le module d'Young augmente, plus la contrainte est élevée pour déformer le matériau d'un même allongement, ce qui correspond à une dureté plus élevée. Une bonne corrélation est observée entre dureté Persoz et module

d'Young, alors qu'il ne semble pas exister de relation entre dureté Persoz et déformation à la rupture.

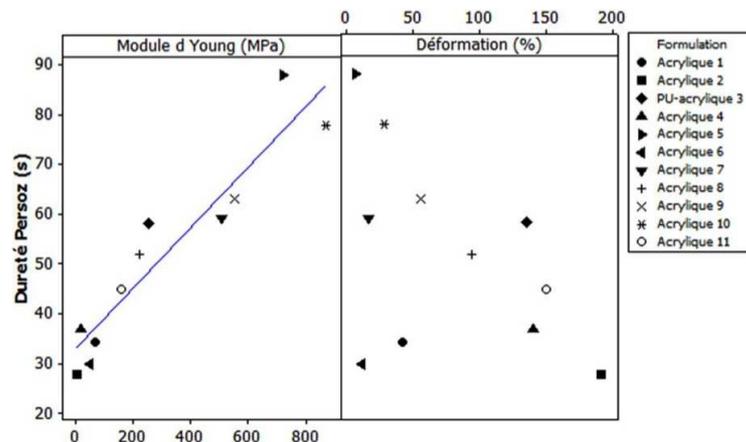


Fig.1 : Dureté Persoz de finitions appliquées sur bois en fonction du module d'Young et de la déformation à la rupture de films libres de finition

Sato (1980) explique qu'une relation existe entre le module d'Young et la dureté pendulaire mesurés sur des films de nitrate de cellulose jusqu'à un certain niveau de module à partir duquel la dureté devient constante. Le pendule de Persoz est donc un outil utile de prédiction de certaines propriétés mécaniques des finitions extérieures pour bois, d'autant que les tests de traction sur film de peintures possèdent de nombreux inconvénients comme rappelé par Zosel (1980). En effet, la réalisation de films libres peut parfois être difficile et certains revêtements trop fins ou trop fragiles ne peuvent être étudiés. De plus, la formation d'un film libre n'est pas complètement représentative de la formation d'un film sur bois, celle-ci étant influencée par l'anatomie de l'essence ou par certains constituants (Grüll *et al.*, 2014).

## Conclusion

L'étude comparative des informations issues des tests de dureté Persoz et de traction montre que le pendule de Persoz permet d'estimer de manière non destructive certaines propriétés mécaniques des revêtements (module d'Young). Cet outil s'avère donc particulièrement utile aux fabricants de finitions extérieures pour bois pour optimiser leurs formulations.

## Références

- Grüll, G., Forsthuber, B., Ecker, M. (2014). Sensitivity of waterborne coating materials to high acidity and high content of arabinogalactan in larch heartwood, 9th International Woodcoatings Congress, Amsterdam (NL), 14-15 October 2014.
- Malassenet L., Podgorski L., George B., Merlin B. (2014). La dureté Persoz : une nouvelle voie d'étude des performances des finitions extérieures pour bois ? 3<sup>ème</sup> journée scientifique du GDR 3544 Sciences du Bois à Nancy, 12-14 novembre 2014.
- Malassenet L., George B., Merlin A., Podgorski L. (2015) Persoz hardness: a useful property to study performance of exterior wood coatings. International Wood Products Journal, accepted on 27<sup>th</sup> August 2015.
- NF EN ISO 1522. (2007). Peintures et vernis. Essai d'amortissement du pendule.
- Sato K. (1980). The hardness of coating films. Progress in Organic coatings, 8, 1-18
- Zosel A. (1980). Mechanical behavior of coating films. Progress in Organic Coatings, 8, 47-49.

D01

## **Etude des propriétés des extractibles de cinq essences camerounaises : ayous, moabi, movingui, padouk et tali**

SAHA TCHINDA Jean-Bosco<sup>1,2</sup> ; NDIKONTAR Maurice Kor<sup>2</sup> ;  
DUMARÇAY Stéphane<sup>2</sup> ; GERARDIN Philippe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Faculté des Sciences  
et Technologies, Université de Lorraine, EA 4370 USC INRA, BP 70239, F-54506  
Vandoeuvre lès Nancy, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Chimie Macromoléculaire, Université de Yaoundé 1, BP 812 Yaoundé-  
Cameroun  
saha\_jb@yahoo.fr

**Mots clefs :** Antioxydant, Bois, Camerounais, Colorant, Durabilité, Extractibles

### **Résumé**

Les avancées scientifiques dans le domaine de la valorisation des substances naturelles issues des plantes (feuilles, écorces, sciures) permettent d'envisager à terme le développement de produits bio-sourcés plus respectueux de l'environnement utilisables dans les domaines de l'énergie, des matériaux et de la chimie fine. Les matières fossiles étant en voie d'épuisement, les chercheurs se tournent ainsi vers des sources facilement renouvelables comme le bois. Actuellement, 52% des médicaments utilisés sont constitués ou dérivés de produits naturels (Newman and Cragg, 2007). Les déchets issus de la première transformation du bois constituent dans ce contexte, un gisement de matière première considérable qu'il convient de valoriser.

Au cours de ce travail, les sciures de cinq essences camerounaises (Ayous, moabi, movingui, Padouk et Tali) ont été extraites au Soxhlet en utilisant quatre solvants : dichlorométhane, l'acétone, le toluène-éthanol (2 :1, v/v) et l'eau distillée. Le screening des extraits a révélé la présence de polyphénols, de saponines, de flavonoïdes, de stérols et de terpènes.

La capacité antioxydante a été évaluée par deux méthodes à savoir : l'inhibition du méthyle linoléate induite par l'AIBN et la capacité des extraits à piéger le radical libre de 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH·). La concentration à l'équilibre pour consommer 50% de DPPH (CE<sub>50</sub>) varie de 2,7 à 60,5 mg/L et l'activité antioxydante pour inhiber le linoléate de méthyle en présence de l'AIBN varie de 10 à 86% (figure 1).

La capacité des extraits à teindre une fibre naturelle (coton) et deux fibres artificielles (viscose de bois et de bambou) a également été évaluée. Les résultats montrent que ces extraits donnent une coloration jaune avec les extraits de movingui et une coloration rouge avec les extraits de padouk.

La durabilité naturelle des bois a été évaluée par la norme européenne EN 350-1, 1994. Il ressort que les pertes de masse deviennent plus importantes lorsque les éprouvettes de bois ont été extraites. La perte de masse des éprouvettes extraites ou non varie de 0,1 à 59% (le hêtre a été pris comme référence). Les essais d'inhibition de croissances sur les champignons de pourriture ont montré qu'à des concentrations de 250 ppm, nos extraits étaient fongistatiques et qu'à des concentrations de 500 ppm certains extraits étaient fongicides (extrait de tali). L'utilisation des extraits pour inhiber la croissance bactérienne a montré que les extraits étaient bactériostatiques pour les concentrations testées.

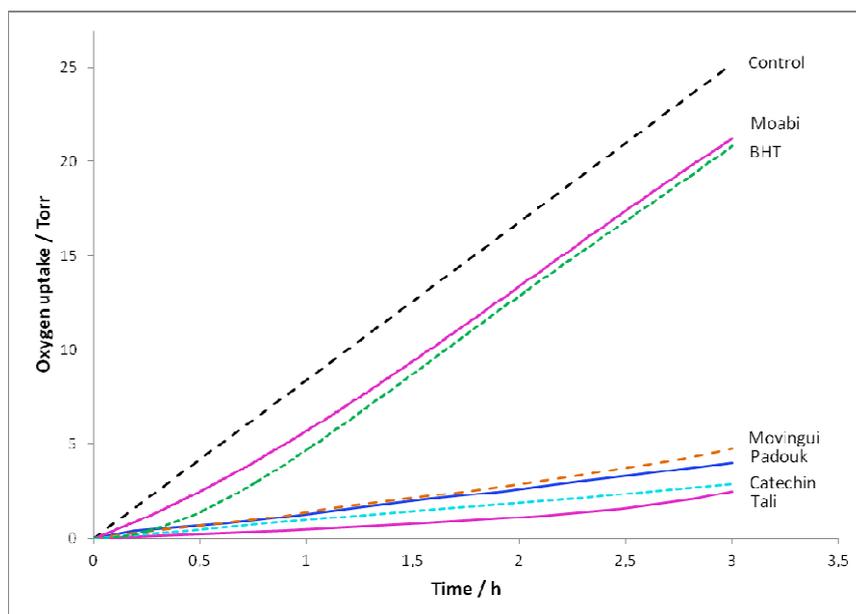


Figure 1 : Consommation d'oxygène durant l'oxydation du linoléate de méthyle en présence des extraits toluène-éthanol de différentes essences

### Références

Newman D.J., Cragg G. M., 2007. Natural Products as Sources of New Drugs over the Last 25 Years. *Journal of Natural Products*. 70: 461-477.

D02

## Dérivés lipophiles ou gélifiants de composés extractibles du bois de type polyphénolique en tant qu'inhibiteurs de corrosion.

SAHMIM Wissem<sup>1,2</sup>, CHAPUIS Hubert<sup>1</sup>, SASSI Wafa<sup>2</sup>, DHOUBI Leila<sup>2</sup>,  
ROCCA Emmanuel<sup>3</sup>, RENAUX Delphine<sup>3</sup>, GERARDIN Christine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), EA 4370- USC INRA, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70 239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France

<sup>2</sup>Equipe COPROMET, Unité de Recherche Mécanique-Energétique, ENIT, Université de Tunis El-Manar, Tunis1002, Tunisie.

<sup>3</sup>Institut Jean Lamour CNRS-Université de Lorraine, Dept CP2S, BP 70239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France  
[wissem.sahmim@univ-lorraine.fr](mailto:wissem.sahmim@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** antioxydant, extractibles du bois, gélifiants, inhibiteurs de corrosion, matériaux métalliques, modification chimique, polyphénols.

### Résumé

Les polyphénols tels que les lignanes, les tanins et les flavonoïdes sont des composés naturels que l'on peut extraire par différentes techniques en quantité variable à partir du bois. Nous nous intéressons ici à la conception, à la synthèse et à la caractérisation des propriétés physicochimiques de dérivés amphiphiles et lipophiles de flavonoïdes. Nous avons ainsi envisagé de modifier la structure de ces extractibles du bois pour incorporer des fonctionnalités supplémentaires et aboutir à des composés présentant à la fois des propriétés gélifiantes et des propriétés anti-oxydantes.

Il s'agit d'une part d'effectuer des modifications structurales qui permettent de conserver une activité anti-oxydante aux composés finaux et d'autre part d'évaluer l'impact de ces modifications sur les propriétés de ces dérivés en tant qu'inhibiteurs de corrosion. Des travaux relevés dans la littérature montrent en effet que les polyphénols présents dans certains extraits végétaux, peuvent être utilisés pour retarder la corrosion des métaux. L'objectif est ici d'améliorer ces propriétés en modifiant les propriétés d'adhésion sur le support, la rétention du composé, ... Parallèlement à l'évaluation des propriétés anti-oxydantes des dérivés synthétisés par la méthode au DPPH, nous avons testé, dans un premier temps, les capacités anti-corrosion de la catéchine, en tant que témoin, dans le cas du cuivre. Des essais sont actuellement en cours avec les dérivés afin d'évaluer leur propriétés d'inhibiteurs dans le cas du fer.

### Références

W. Sahmim , W. Sassi, C. Gérardin-Charbonnier, L. Dhouibi, *J. Mater. Environ. Sci.*6 (6) (2015) 1586-1591.

S. Khoudali, D. Benmessaoud left, A. Essaqui, M. Zertoubi, M. Azzi, M. Benaissa. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (3) (2014) 887-898

D03

## Utilisation des énergies intermittentes pour le séchage du bois : Etude expérimentale et numérique

SALEM Thouraya<sup>1</sup>, PERRE Patrick<sup>2</sup>, BOUALI Anis<sup>1</sup>, MOUGEL Eric<sup>1</sup>, REMOND Romain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), ENSTIB, Epinal, 88026, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 92290, Châtenay-Malabry, France  
[romain.remond@univ-lorraine.fr](mailto:romain.remond@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Bois, séchage intermittente, qualité du séchage

### Introduction

Le séchage convectif du bois d'œuvre est une opération coûteuse en énergie. L'utilisation des énergies intermittentes à faible contenu exergétique (rejets d'eaux de refroidissement des centrales électriques, énergie solaire, énergie éolienne...) permettrait non seulement de réduire la consommation énergétique mais aussi d'améliorer la qualité du bois séché en activant le fluage mécanosorptif.

Dans ce travail, l'impact de l'intermittence de l'apport énergétique sur la qualité et sur la durée du séchage a été étudié expérimentalement et numériquement. Ensuite, différentes stratégies de séchage en conduite fluctuante ont été comparées avec le séchage convectif.

### Résultats et discussions

Le code TransPore, code simulant les transferts couplés de masse et de chaleur dans un milieu poreux (Patrick Perré et Ian Turner 1999) a été utilisé.

Afin de valider les prédictions du code pour les conduites de séchage intermittentes, des confrontations entre les simulations et les résultats des essais de séchage en conduite constante et intermittente sur des échantillons de hêtre ont été effectuées. Deux configurations particulières de séchage ont été utilisées : séchage dissymétrique (flying wood) (Fig. 1a) et séchage sous charge (flexion 3 points) (Fig. 1b).

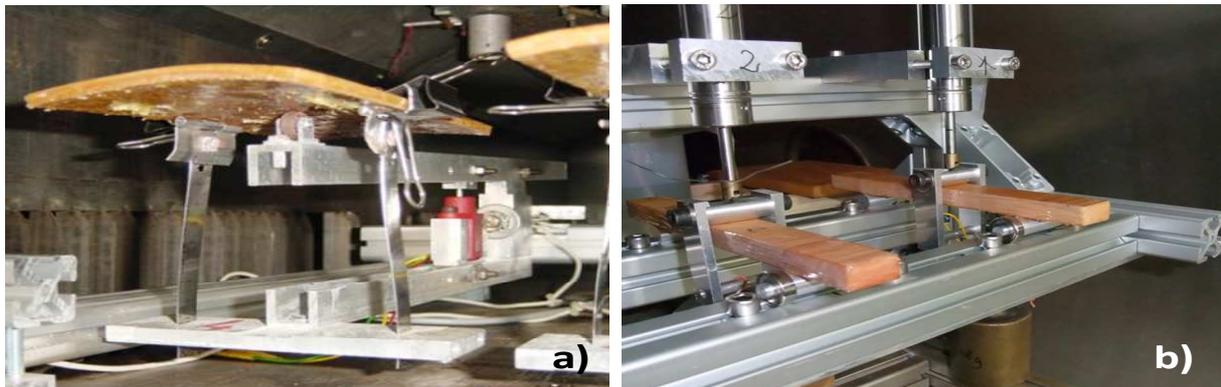
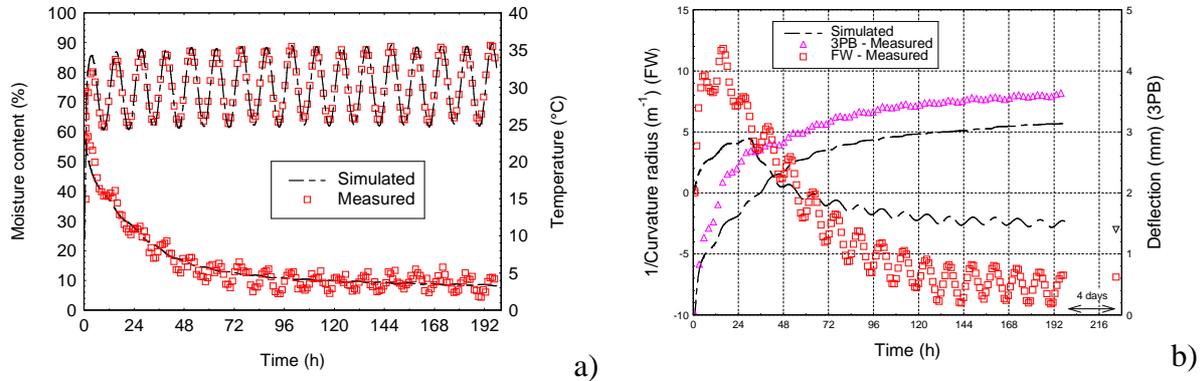


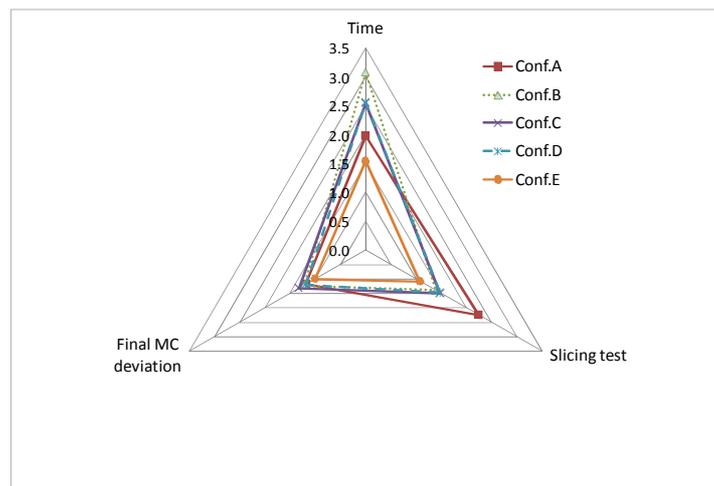
Fig.1 : Echantillons fixés aux dispositifs expérimentaux: (a) flyingwood et (b) flexion 3 points. (Mariella Lefevre, 2012)

Afin d'améliorer les prédictions du code, nous avons implémenté le modèle mécanosorptif de Fortino et al. (2009) dans la formulation mécanique. Les résultats des confrontations montrent une bonne cohérence entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux au niveau de la cinétique (Fig. 2a) pour une conduite de séchage intermittente. Au niveau de la

réponse mécanique (Fig. 2b), le code reproduit les tendances observées mais avec une amplitude plus faible. Nous avons utilisé ensuite le code pour comparer la qualité de séchage obtenue avec différentes conduites de séchage y compris le séchage intermittent. La qualité du séchage a été évaluée à travers le gradient final de teneur en eau, la durée de séchage et le « slicing test » (Fig. 3).



**Fig. 2 :** Cinétique de séchage (a) et réponse mécanique (flying wood et flexion trois points) (b) pour un échantillon débité sur quartier (séchage oscillant en température sèche).



**Fig. 3 :** Graphique en radar pour analyser différentes stratégies de séchage.

L'étape suivante consistera à étudier la performance du séchage intermittent à l'aide d'un modèle multi-échelle qui intègre le calcul du cout énergétique et économique du séchage.

## Références

- De La Cruz-Lefevre, M. (2012) Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois, Ph.D. Thesis. AgroParisTech, France, 217 p.
- Fortino S.; Mirianon F.; Toratti T. (2009) A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mech Time-Depend Mater*, 13: 333-356.
- Perré, P.; Turner, I. W. (1999) A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42: 4501-4521.

D04

**Etude de la résistance du pin sylvestre imprégné par un monomère poly -glycérol / anhydride maléique suivi d'un traitement thermique à différentes températures contre des termites *Reticulitermes flavipes***

SALMAN Solafa<sup>1</sup>; PETRISSANS Anélie<sup>1</sup>; DUMARÇAY Stéphane<sup>1</sup>,  
THEVENON Marie France<sup>2</sup>; GERARDIN Philippe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois, EA 4370-USC INRA, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, F-54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>2</sup> Laboratoire de préservation des bois, CIRAD PERSYST, UPR 40, TA B 40/16, 73 rue Jean François Breton, F-34398 Montpellier Cedex 5, France

### Résumé

Les pressions environnementales apparues en France et dans la plupart des pays européens au cours des dernières années ont considérablement modifié les pratiques en matière de protection du bois. Dans ce contexte, les législations et les règlements, parmi lesquels les directives sur l'utilisation et la réglementation des produits biocides, sont de plus en plus contraignantes conduisant à l'élaboration de formulations de préservation plus respectueuses de l'environnement. Il y a donc un intérêt croissant pour des solutions alternatives non biocides comme des traitements thermiques ou des modifications chimiques. Le traitement thermique du bois a été l'une des méthodes de substitution les plus étudiées au cours des dernières années. Cependant, même si certaines des propriétés du bois, comme sa résistance à la pourriture et sa stabilité dimensionnelle, sont améliorées, la durabilité globale du matériau ne suffit pas à envisager l'utilisation en classe 3 et 4 (applications où le bois est en contact direct avec le sol et les termites). L'objectif de notre étude est l'imprégnation du bois par un monomère à base de polyglycérol et d'anhydride maléique (AM /PG) avant de le soumettre à un traitement thermique à différentes températures (150,180, 200 et 220°C). Ces traitements peuvent être une alternative précieuse pour améliorer les performances du bois thermiquement modifié en contact avec le sol et en particulier sa résistance aux termites dans des conditions extérieures.

### Résultats

Les principaux résultats sont rassemblés dans les tableaux 1 et 2. Ils indiquent une amélioration significative de la durabilité des éprouvettes traitées avec AM/PG 10% contre des termites même après le lessivage. L'association additif / traitement thermique confère comme attendu une amélioration de la durabilité face aux champignons basidiomycètes. Ces traitements peuvent être une alternative précieuse pour l'utilisation du bois modifié thermiquement dans des conditions extérieures.

Tableau 1 : Résistance des éprouvettes de pin sylvestres traitées aux termites

Traitement		Perte de masse (%)		Taux de survie (%)		
Additif	Concentration	Température	Avant	Après	Avant	Après
	%	°C	lessivage	lessivage	lessivage	lessivage
AM/PG	5	150	9,07±0,61	9,26±0,57	56,7	53,3
		180	6,24±1,52	9,55±2,77	25	51
		200	9,11±1,02	10,14±2,57	44,7	44,7
		220	5,69±0,51	6,74±0,75	4	20
AM/PG	10	150	2,32±0,58	3,57±1,12	0	6
		180	2,68±0,14	4,88±1,69	0	15,3
		200	3,03±0,96	4,59±1,81	0	17,3
		220	1,66±0,46	4,16±0,22	2,7	5,3
-	-	150	10,26±0,71	15,38±2,43	66	79,3
		180	15,17±1,04	17,82 ±1,92	78	81,3
		200	16,64±0,38	19,65 ±3,36	77,8	78,7
		220	20,38±4,87	21,75 ±4,02	72	80
Control			10,64±1,19		74,75	

Tableau 2 : Résistance des éprouvettes de pin sylvestres traitées aux champignons.

Traitement			Perte de mass (%)			
Additive	Concentration	Température	Avant lessivage		Après lessivage	
	%	°C	p.p	c.p	p.p	c.p
AM/PG	5	150	41,79 ± 6,65	33,1 ± 4,98	41,95 ± 12,09	29,11 ± 10,11
		180	34,1 ± 8,40	11,75 ± 8,43	37,03 ± 11,03	22,75 ± 5,87
		200	22,96 ± 4,79	3,75 ± 2,96	25,57 ± 9,34	4,98 ± 3,65
		220	0,92 ± 1,20	0,69 ± 0,96	1,04 ± 0,70	0,37 ± 0,63
AM/PG	10	150	34,47 ± 10,54	13,17 ± 2,68	31,67 ± 7,62	20,9 ± 6,74
		180	25,18 ± 9,96	4,61 ± 2,54	25,74 ± 6,89	6,2 ± 2,72
		200	5,48 ± 1,01	2,15 ± 0,97	11,25 ± 4,94	2,85 ± 1,54
		220	0,81 ± 0,09	0,48 ± 0,78	1,64 ± 0,06	0,93 ± 0,23
-	-	150	45,06 ± 14,20	40,07 ± 10,43	49,73 ± 12,84	42,68 ± 11,92
		180	40,89 ± 9,16	40,92 ± 9,92	44,54 ± 11,43	41,61 ± 12,23
		200	23,98 ± 7,61	6,57 ± 2,39	30,6 ± 11,65	8,12 ± 3,27
		220	11,71 ± 3,31	3,97 ± 0,17	30,6 ± 11,65	5,02 ± 1,95
Control			50,41 ± 11,18	45,76 ± 7,22		

D05

## Synthèse de mousses bisourcées à base de tannins et de lignine

MERLE Juliette<sup>1</sup>, BIROT Marc<sup>2</sup>, DELEUZE Hervé<sup>2</sup>, CARRE Hélène<sup>3</sup>,  
CHARRIER EL-BOUHTOURY Fatima<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IPREM/EPCP, UMR CNRS 5254, IUT des Pays de l'Adour, 371 Rue du Ruisseau, BP 201, 40004 Mont de Marsan, France.

<sup>2</sup> Université de Bordeaux, ISM, UMR CNRS 5255, F-33400 Talence, France.  
[h.deleuze@ism.u-bordeaux1.fr](mailto:h.deleuze@ism.u-bordeaux1.fr); [m.birotd@ism.u-bordeaux1.fr](mailto:m.birotd@ism.u-bordeaux1.fr)

<sup>3</sup>ISA BTP - SIAME, Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet, France  
[helene.carre@univ-pau.fr](mailto:helene.carre@univ-pau.fr), [fatima.charrier@univ-pau.fr](mailto:fatima.charrier@univ-pau.fr), [juliette.merle.univpau@gmail.com](mailto:juliette.merle.univpau@gmail.com)

**Mots clefs :** mousse rigide biosourcées, isolation, lignine, tanins

### Introduction

Ce travail de thèse s'inscrit dans une démarche d'éco-responsabilité et de développement durable visant à apporter des solutions alternatives aux mousses actuelles issues de la pétrochimie. Dans ce cadre, nous avons axé notre travail sur l'élaboration de mousses biosourcées en utilisant un procédé simple et le plus vert possible.

Dans un contexte où l'utilisation des ressources pétrochimiques est de plus en plus prohibée, au vu de sa raréfaction du pétrole et de la fluctuation des prix qui en résulte, nos matériaux ont été fabriqués à partir de matières premières naturelles et renouvelables telles que les tanins, extractibles issus du bois, ou encore la lignine, sous-produit de l'industrie papetière.

Les résultats présentés concerneront les caractéristiques structurales des matériaux que nous avons obtenus ainsi que leur conductivité thermique.

A notre connaissance, à ce jour aucune étude n'a été effectuée sur la préparation de mousses contenant à la fois de la lignine et des tanins.

### Résultats et Discussion

Le moussage mécanique par cisaillement est un procédé connu depuis plusieurs années comme le montre un brevet associé à la société Dow Chemical sur préparation des mousses de polyuréthane (Gribble et al. 2001). Nous avons décidé d'utiliser cette approche pour nos mélanges dont les principaux composants sont les tanins et la lignine auxquels ont été ajoutés de l'hexamine et du glyoxal comme agents de durcissement.

Le moussage, réalisé par dissolution de tous les composés dans un milieu aqueux, est suivi d'une homogénéisation. Une vitesse d'agitation, plus importante que celle utilisée pour l'homogénéisation, va permettre l'incorporation de bulles d'air dans le mélange. Ces dernières vont alors se comporter comme une matrice pour les matériaux finaux. Un agent tensio-actif est utilisé pour la stabilisation des mousses. Aucun agent d'expansion n'est ajouté à la formulation.

Différentes formulations ont été élaborées et la morphologie des mousses, analysée par microscopie électronique à balayage (SEM) montre que les mousses sont majoritairement à cellules ouvertes. Les diamètres des cellules, mesurés à partir des micrographies MEB, en utilisant le logiciel ImageJ, ne dépasse pas 200 µm, quelle que soit l'échantillon analysé.

Les caractéristiques morphologiques et structurales sont principalement étudiées à l'aide du MEB et d'un porosimètre à mercure. Les données recueillies se retrouvent dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des mousses

Echantillons	M1	M2	M3	M4
Porosité <sup>a</sup> (%)	88	89	90	89
Diamètres moyen des cellules <sup>b</sup> (µm)	115	100	107	95
Diamètres moyens des pores ou interconnexions <sup>a</sup> (µm)	6.7	5.2	8.3	8.5
Densités apparentes (g/cm <sup>3</sup> )	0.17	0.18	0.15	0.15
Conductivité thermique (W/m·K)	0.038	0.042	0.035	0.037

<sup>a</sup> estimé grâce à un porosimètre à mercure, <sup>b</sup> images analysées par MEB

Les cellules de ces mousses ont une taille variant de 95 à 115 µm avec des densités entre 0,15 et 0,18 g/cm<sup>3</sup>. Ainsi, sachant que le diamètre moyen des cellules est supérieur à 50nm, si l'on se réfère aux travaux de Sing (Sing et al. 1985), les matériaux obtenus sont des mousses macroporeuses.

Concernant les mesures de conductivité thermique, elles ont été effectuées à 20°C en utilisant un appareil Hot Disk TPS 1500 (Thermoconcept, France) sur la base de la méthode de la source plane transitoire. Les valeurs de conductivité sont de 0,035 à 0,042 W/mK.

## Conclusion

Dans ce travail, les mousses macroporeuses obtenues à partir de tanins et de lignine sont prometteuses. Les performances thermiques peuvent laisser penser que nous pourrions les utiliser comme isolants thermiques. En effet, si l'on prend comme référence les mousses polyuréthanes rigides, ces dernières sont considérées comme isolants thermiques pour des valeurs de conductivité thermique comprises entre 0,020 et 0,050 W/m·K (Belgium 2006).

## Références

- Belgium, Brussels. 2006. "Thermal Insulation Materials Made of Rigid Polyurethane Foam." Associations, Federation of European Rigid Polyurethane Foam: 1–33.
- Gribble, Michael Y. et al. 2001. "Polyurethane Foams Prepared from Mechanically Frothed Polyurethane Dispersions."
- Sing, K. S. W. et al. 1985. "International Union of Pure Commission on Colloid and Surface Chemistry Including Catalysis Reporting Physisorption Data for Gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity." Pure & Appl. Chem. 57(4): 603–19.

D06

## Qualité du bois et matériaux composites à base de bois ; LabECAM Lyon

ALTEYRAC Jérôme<sup>1</sup>, VIDAL Marcia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ECAM Lyon

[jerome.alteyrac@ecam.fr](mailto:jerome.alteyrac@ecam.fr)

**Mots clefs :** Adhésifs, LabECAM, matériaux composites, polymères, qualité du bois.

### Introduction

A la rentrée 2013, l'ECAM Lyon, école d'ingénieur généraliste, a inauguré une formation ingénieur ECAM Spécialité Bois par alternance. En même temps elle a intégré au sein de son équipe de chercheurs, deux enseignants chercheurs, J. Alteyrac et M. Vidal Bastias, afin de développer des projets de recherche dans le domaine du bois. Leur rôle au sein du LabECAM, le laboratoire de recherche de l'ECAM, est de développer la recherche sur le bois sur la qualité du bois et les matériaux composites, tout en tenant compte de l'intérêt des partenaires industriels de la formation.

J. Alteyrac est spécialiste de qualité du bois et a effectué sa thèse à l'université Laval (Québec) sur la qualité du bois de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) (Alteyrac (2005)). La thèse de M. Vidal Bastias a été effectuée dans la même université sur le pressage des panneaux MDF (Vidal Bastias (2006)).

La recherche sur le bois complètera les travaux réalisés actuellement par les enseignants chercheurs du LabECAM dont les thématiques sont, entre autres, le calcul des structures, les sciences des matériaux et la conception mécanique.

Les équipements disponibles dans ce laboratoire sont pour la plupart utilisables dans le domaine du bois et dérivés du bois; microscopes (MEB, optiques), bancs d'essais (compression, traction, flexion), diffraction des rayons-X, étuves, fours, presse à injecter, rhéomètre, ATG et DSC (caractérisation des polymères), conductivité électrique.

Ainsi, les domaines de recherche envisagés pour la filière bois au LabECAM seront orientés selon deux thématiques :

- Qualité du bois (construction bois, charpentes, et scieries) : résistance mécanique, classement, classes d'utilisation, durabilité, rendement sciage, qualité des sciages, séchage du bois
- Matériaux composites (Industrie des panneaux): adhésifs, fibres, cohésion interne, stabilité dimensionnelle, pressage

### Travaux de recherche antérieurs

La recherche sur la qualité du bois et l'utilisation de la ressource forestière dans l'industrie du bois réalisée au Canada à Québec et Vancouver, ainsi qu'au Chili à Concepcion avait comme problématique générale celle de la qualité du bois (anatomie, physique, mécanique) en relation avec les conditions de croissance des arbres (Alteyrac (2005) ; Alteyrac et al. (2005)) ainsi que les relations entre les différentes propriétés du bois (Alteyrac et al. (2006)) ou encore la mesure des contraintes de maturation chez l'Eucalyptus (Clair et al. (2013)).

Une autre étude réalisée en Colombie Britannique avait pour but de déterminer les quantités de résidus produits par l'industrie forestière de première transformation et leur utilisation comme matière première dans les autres industries du bois (McFarlane et al. (2008a) ; McFarlane et al. (2008b) ; Ackom et al. (2007)).

M. Vidal Bastias a, quant à elle, étudié le pressage des panneaux MDF à l'aide des éléments finis (Vidal Bastias (2006)) (Fig. 1), ainsi que le phénomène de sorption/désorption pour la résolution des problèmes de diffusion de l'eau lors du pressage à chaud (Vidal Bastias et Cloutier (2005)). Des travaux plus récents ont porté sur l'utilisation de nouveaux adhésifs d'origine naturelle dans le procédé de fabrication des panneaux (Vidal Bastias (2011)).

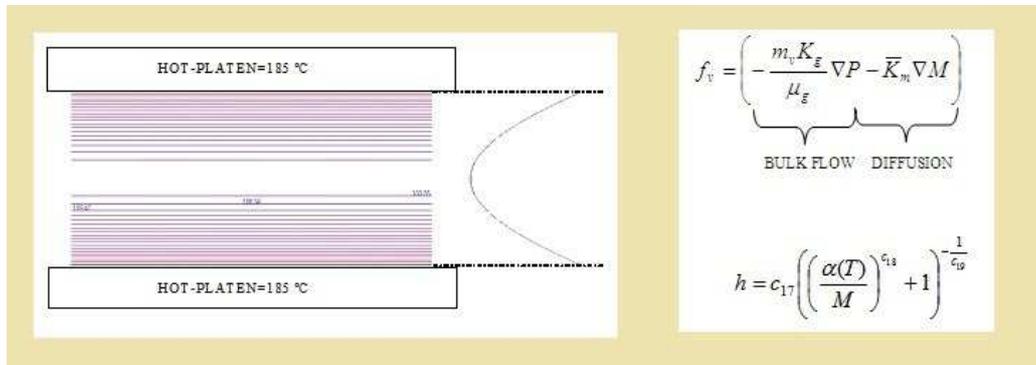


Fig. 1 : Transfert de masse et de chaleur lors du procédé de pressage à chaud

## Références

- Ackom E., P. N. McFarlane, J. Alteyrac, W. E. Mabee, and J. N. Saddler. (2007). Lignocellulosic biorefinery concept and industrial symbioses in British Columbia. In International Society for Industrial Ecology Conference, June, 17–20.
- Alteyrac J. (2005). “Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l’arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d’épinette noire (*Picea Mariana* (Mill.) BSP). Université Laval Québec.
- Alteyrac J., A. Cloutier, C. H. Ung, and S. Y. Zhang. (2006). Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce. *Wood and Fiber Science* 38 (2): 229–37.
- Alteyrac J., S. Y. Zhang, A. Cloutier, and J. C. Ruel. (2005). Influence of stand density on ring width and wood density at different sampling heights in black spruce (*Picea Mariana* (Mill.) BSP). *Wood and Fiber Science* 37 (1): 83–94.
- Clair B, J. Alteyrac, A. Gronvold, J. Espejo, B. Chanson, and T. Alméras. (2013). Patterns of longitudinal and tangential maturation stresses in *Eucalyptus nitens* plantation trees. *Annals of Forest Science* 70 (8): 801–11.
- McFarlane P., E. Ackom, J. Alteyrac, and V. Adamowicz. (2008a). “Global Energy”. Forest Futures Project of the SFM Network #5. Drivers of change in Canada’s forests and forest sector. Alberta, Canada.
- McFarlane P., E. Ackom, J. Alteyrac, and V. Adamowicz. (2008b). “Technology” Forest Futures Project of the SFM Network #6. Drivers of change in Canada’s forests and forest sector. Alberta, Canada.
- Vidal Bastias M. (2006). Modélisation du pressage à chaud des panneaux de fibres de bois (MDF) par la méthode des éléments finis. Québec: Université Laval.
- Vidal Bastias M. (2011). Alternative adhesives systems for the wood composites industry. Seattle, USA. International Symposium on Wood Composites & Veneer Processing and Products.
- Vidal Bastías M., and A. Cloutier. (2005). Evaluation of wood sorption models for high temperatures. *Maderas. Ciencia Y Tecnología* 7 (3): 145–58.

D07

## Cinétique de séchage des bois tropicaux : application à l'Okoumé, au Movingui et au paddouk

EKOMY ANGO Serge<sup>1</sup>, LABASSOU HARA David<sup>2</sup>, BAKITA MOUSSAVOU<sup>3</sup>, IKOGOU Samuel<sup>2</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,4,5</sup>,

<sup>1</sup>Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST), IRT, Libreville, Gabon

<sup>2</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon

<sup>3</sup>Ecole Normal de l'Enseignement Technique (ENSET), Libreville, Gabon

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, Aubière, France  
ekomyango@yahoo.fr

**Mots clés :** Bois tropicaux, séchage, bois-énergie

### Introduction

La valorisation des déchets de bois issu de la transformation du bois dans les industries de bois du bassin du Congo plus particulièrement au Gabon est laborieuse. Elle s'est accentuée suite aux recommandations de l'état gabonais à transformer une bonne partie de ses agrumes au Gabon. L'une des solutions est le recyclage de ses déchets pour pallier au manque de production d'énergie verte (Eligon et al. 1992) observé dans les pays de la sous-région d'Afrique centrale. De ce fait, cette initiative pourrait contribuer à des bonnes utilisations en bois-énergie dans un pays où l'emploi de cette matière première est souvent relégué au second plan malgré le potentiel qu'il représente. C'est dans ce cadre que nous avons menés une étude sur l'analyse des caractéristiques bioénergétiques des déchets de bois de trois essences locales très exploitées au Gabon (Gérard et al. 1998) : l'Okoumé, le Movingui et le Padouk, Tab. 1.

Tab. 1 : Référence des essences étudiées

Essences	Familles	Nom scientifique	Nom commercial
Okoumé	Burseraceae	Aucoumea klaneana pierre	Okoumé
Movingui	Césalpiniacées	Distemonanthus benthamianus Baill	Movingui ou Eyen au Cameroun et au Gabon.
Padouk	Fabacées	Pterocarpus soyauxii Taub	Padouk

### Matériaux et méthodes

Les études ont été menées sur les principaux types de déchets présents dans les industries de bois au Gabon, notamment : les déchets de bois, la sciure et les copeaux, Figure 1



Fig. 1 : Déchets de bois utilisés : (a) morceaux de bois, (b) copeaux de bois, (c) sciure de bois

Les normes Européennes d'utilisation du bois-énergie ont été utilisées pour déterminer les différentes cinétiques de séchage. On citera notamment la méthode CENT/TS 14774 (méthode dite par étuvage pour le taux d'humidité), la NF B-51005 (méthode dite stéréométrique pour la masse volumique) et la NF EN 14918 pour le pouvoir calorifique (FIBRA 2010).

## Résultats et discussion

La Figure 2 présente les évolutions des teneurs en eau dans les buches (Figure 1) des trois essences pendant le séchage. On constate que les trois courbes ont globalement la même allure. Toutefois, le Padouk, réputé être plus dense, exhibe une quantité moins importante d'eau que les deux autres essences et présente une humidité interne inférieure qui se stabilise aux alentours de 2% à la fin de l'extraction.

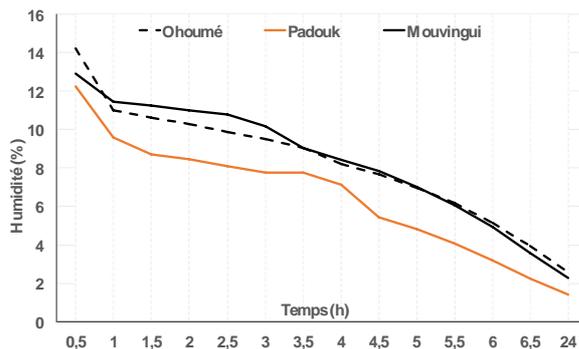


Fig. 2 : Evolution de la teneur en eau des buches de bois en étuve

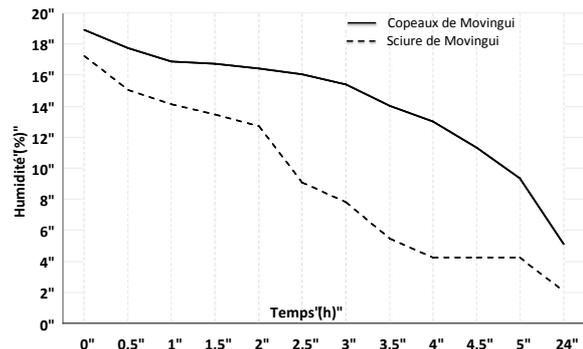


Fig. 3 : Evolution de l'humidité de copeaux et de sciure du Mouvingui

La figure 3 présente l'évolution de la teneur en eau des copeaux et sciure de Mouvingui suite au séchage. On observe que la teneur en eau de la sciure reste inférieure à celles des copeaux, ce qui se justifie par la quantité d'eau plus importante dans les derniers déchets avec une perte plus lente 1h après le début de l'essai. On notera que la teneur en eau initiale est plus importante dans les copeaux et sciure que dans les buches de la figure 2.

## Conclusion et perspective

En définitive, l'extraction de l'eau libre quelque soit l'essence et le type de déchets conduit sensiblement à la même cinétique de séchage. La détermination des caractéristiques bioénergétiques des déchets des essences de bois les plus utilisés dans le bassin du Congo permettra d'optimiser leur exploitation à des fins énergétiques. De ce fait, en fonction de l'humidité, du PCI (Pouvoir Calorifique) et des caractéristiques mécaniques de chaque déchets on pourra par exemple mieux les assembler pour tirer le meilleur rendement énergétique de ces produits lors de leurs utilisations.

## Références

- FIBRA (2010) Les combustibles bois : méthodes de caractérisation des produits. [http://www.fibra.net/upload/pdf/combustible\\_bois\\_caracterisation.pdf](http://www.fibra.net/upload/pdf/combustible_bois_caracterisation.pdf).
- Eligon A. M., Achong A., Saunders R. (1992) Moisture adsorption and desorption properties of some tropical woods, *Journal of Wood Science*, 27(13), 3442-3456.
- Gérard J. et al. (1998) Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains. CIRAD-forêt éd. Montpellier cedex : Campus International de Baillarguet; 186p.

D08

## Comportement mécanique de l'Okoumé (*Aucoumea Klaineana*) soumis à la dessiccation.

NDONG MEYE Stevy Lemey<sup>1</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>2,3,4</sup>,  
EKOMY ANGO Serge<sup>2</sup>, IKOGOU Samuel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon

<sup>2</sup>Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST), IRT,  
Libreville, Gabon

<sup>3</sup>Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448,  
Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, Aubière, France

[ekomyango@yahoo.fr](mailto:ekomyango@yahoo.fr)

**Mots clés :** Déformations, analyse d'images, bois vert, dessiccation, rondelle, Okoumé.

### Introduction

Aujourd'hui, les enjeux environnementaux font que le bois et ses dérivés prennent une place continument importante à cause de leur impact écologique notamment dans les régions équatoriales comme le Gabon qui regorge d'innombrables essences. L'Okoumé, l'une d'entre elles, est beaucoup utilisé dans la construction, les placages, les produits finis ou semis finis ainsi que dans la conception du papier. Le débité est souvent utilisé après le séchage, mais également immédiatement après la coupe. Cependant, le retrait et le comportement mécanique du bois au cours du séchage jouent un rôle décisif dans le développement des défauts (Moutee 2006). Dans ce travail, on s'intéresse au comportement mécanique du bois d'Okoumé (*Aucoumea klaineana*) soumis à la dessiccation. Les déformations radiales et tangentielles sont évaluées en utilisant la méthode d'analyse d'images.

### Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental est constitué de plusieurs parties distinctes à savoir : une table d'essai, une balance, une règle graduée, un thermomètre, un marqueur, une rondelle de bois et un appareil photo numérique. Le protocole est basé sur une rondelle de bois vert d'okoumé (*Aucoumea klaineana*) d'une épaisseur de 3 cm  $\pm$  2.0 et d'un diamètre de 20 cm  $\pm$  0.5. L'éprouvette est d'abord conditionnée dans de l'eau pour qu'elle soit saturée. On met ensuite les marques sur l'échantillon pour mesurer les déplacements à l'aide de la règle et de l'appareil photo. La rondelle est finalement est positionnée sur la balance afin de mesurer les variations de masse au cours de la dessiccation.

### Résultats et discussion

Les modules élastiques radial  $E_R$ , tangentiel,  $E_L$  et de cisaillement  $G_{RT}$  sont obtenus en exploitant l'équation 1 (Guitard 1987)

$$\begin{cases} E_R = S_{11}^{-1} = 1810 * \left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.30} \\ E_Y = S_{22}^{-1} = 1030 * \left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.74} \\ G_{RT} = S_{66}^{-1} = 366 * \left(\frac{\rho}{0.65}\right)^{1.74} \end{cases} \quad \text{Equation 1}$$

Tab. 1 : Module d'élasticité selon le modèle de Guitard

	H(%)	Mv (g/cm <sup>3</sup> )	Er (MPa)	Et (MPa)	Grt (MPa)
Essai 1	12,07	0,42	1037	448	173
Essai 2	12,04	0,42	1040	448	174
Guitard	14,30	0,42	1170	736	70

La Figure 1 présente l'évolution des déformations radiales en fonction de l'humidité interne. Nous avons déduit que le point de saturation cette essence avoisine les 30%.

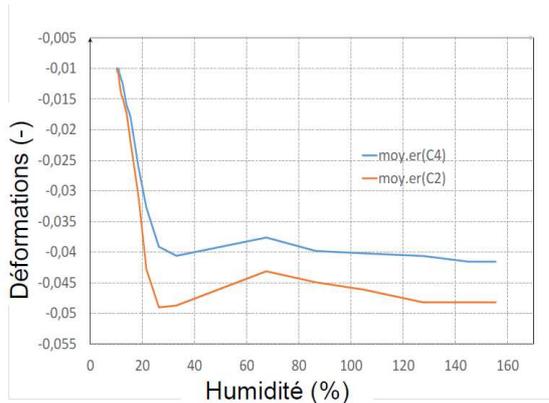


Fig. 1 : Evolution des déformations radiales vs humidité

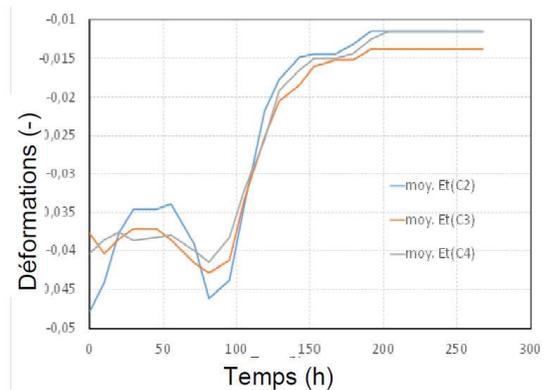


Fig. 2 : Moyenne des déformations tangentielles en fonction du temps

La Figure 2 par contre montre l'évolution des déformations tangentielles en fonction du temps. Ce résultat permet de conclure que les déformations au cœur de la rondelle sont plus importantes qu'à la périphérie et l'influence de la fissure, qui survient environ 4 jours après le début de l'essai, sur les déformations est observée.

### Conclusion et perspective

Les travaux de recherche présentés ont permis d'élargir le champ de connaissances liées au comportement mécanique du bois d'Okoumé soumis à la dessiccation. Ces résultats nous ont permis d'avoir une valeur assez précise du PSF. Les résultats ont également montré que les déformations au centre sont plus importantes au centre qu'à la périphérie et la perturbation de la fissure sur les déformations (Moutou Pitti 2012). On souhaiterait pour les travaux avenir à incorporer les modèles sur l'évolution du taux d'énergie de restitution, sur le phénomène de la fissure pour les perturbations engendrées dans l'évolution des déformations.

### Références

- Guitard D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites. Collection Nabla, Cepadues Edition, 238 p.
- Moutee M. (2006) Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 194 p.
- Moutou Pitti R. (2012) Mesure des déplacements par analyse d'images : déformations lors du séchage d'une rondelle de bois vert, EUE. ISBN : 978-3-8417-9719-3.

D09

## Carbonisation du bois humide ou sec, dépouillement des observations par analyse d'images

KARAKY Hamzé<sup>1</sup>, THERY-PARISOT Isabelle<sup>2</sup>, FOURNELY Eric<sup>1,3</sup>,  
AUDEBERT Philippe<sup>1,4</sup>, CHERRE Jean-Pierre<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Clermont Université, Université Blaise Pascal, Polytech Clermont-F.<sup>d</sup>, 63170 Aubière

<sup>2</sup> CEPAM- UMR 7264 CNRS Université Nice Sophia Antipolis 06357 Nice Cedex 4

<sup>3</sup> Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, 63000 Clermont-F.<sup>d</sup>

<sup>4</sup> Clermont Université, Université Blaise Pascal, IUT d'Allier GTE 03107 Montluçon,  
[eric.fournely@univ-bpclermont.fr](mailto:eric.fournely@univ-bpclermont.fr)

**Mots clefs :** carbonisation, section résiduelle, charbon, humidité, analyse d'images.

### Résumé

Le bois est un matériau de construction qui a été utilisé avec un degré de transformation plus ou moins important, pouvant aller de l'utilisation directe de l'arbre sur pied à celle d'un matériau déconstruit et reconstruit à différentes échelles, en passant par l'utilisation d'éléments plus ou moins séchés et plus ou moins équarris. Le bois peut être considéré à la fois comme un matériau ayant un bon comportement sous incendie, mais également comme un comburant apportant un potentiel combustible au sein de la structure dont il assure la fonction de résistance mécanique. La réponse à cette apparente contradiction réside dans sa faible vitesse de combustion et dans sa transformation au cours de cette carbonisation conduisant au charbon de bois qui génère une couche protectrice stable.

La présence d'eau au sein de la structure même du bois impacte dans une large mesure son comportement mécanique à température ambiante aussi bien instantané que différé. La carbonisation du bois passant par la phase d'évaporation de cette eau ne peut qu'avoir elle aussi a priori un impact sur son comportement sous incendie. Le but de ce travail est de mettre en œuvre une démarche d'analyse de cet impact sur des bois présentant différentes humidités, bois vert, bois saturé, bois dit "sec". L'analyse d'images est utilisée pour mesurer cet impact. L'objectif de ce travail vise autant à la partie saine de la poutre après incendie que la partie carbonisée et à la zone de transition. Dans le premier cas, l'étude trouve son intérêt dans la détermination des caractéristiques mécaniques des structures pendant et après incendie, notamment sur la détermination des résistances résiduelles. Dans le second cas, l'intérêt peut-être beaucoup moins immédiat avec l'analyse de charbons anciens et la recherche d'indices permettant de détecter l'état du bois avant carbonisation, bois d'œuvre ou arbre sur pied.

Les outils mis en œuvre pour cette étude sont eux aussi multiples, bases de données photographiques, un four permettant la combustion de bois de différentes tailles allant jusqu'à des tronçons de poutres de 60 cm de long en contrôlant la courbe de montée en température, différents outils de prise d'images allant de photos macroscopiques à des photos à différents niveaux de grossissement et de recomposition d'images. Les images utilisées proviennent de la base du CEPAM de Nice, du CSTB. Le four est celui de l'université Blaise Pascal sur le site de l'IUT de Montluçon. Les prises de vues ont été réalisées avec des matériels du département génie physique de Polytech Clermont-Ferrand. La composition d'images a été réalisée avec le logiciel ICE et l'analyse de ces images a été réalisée avec le logiciel ImageJ.

Le travail présenté ici relève plus d'une étude faisabilité et d'analyse de précision de dépouillement que d'une analyse complète de la problématique exposée en introduction. Une étape aborde la détermination des caractéristiques sectorielles d'une poutre après une carbonisation interrompue, l'utilisation d'ImageJ et la précision des résultats obtenus est

discutée. Une autre étape présente l'utilisation d'imageJ sur des charbons de bois avec analyse de différents paramètres permettant de caractériser le nombre, la taille et la forme des fissures observées sur ces charbons. Une troisième étape présente la campagne expérimentale réalisée dans le cadre de cette étude sur cinq éprouvettes présentant différents niveaux d'humidité, avec le suivi de la carbonisation, l'obtention des images et l'analyse d'images réalisée.

A titre d'illustration, la figure 1 présente quelques unes des étapes suivies pour ces différentes investigations avec par exemple,

- la détection des formes résiduelles de poutres et de l'orientation des axes principaux d'inertie avec impact de l'incrustation de différentes grilles et leur impact sur la précision,
- la mise en œuvre des éléments soumis à l'essai de carbonisation,
- la recomposition d'images et la recherche de la répartition du diamètre de Féret des fissures

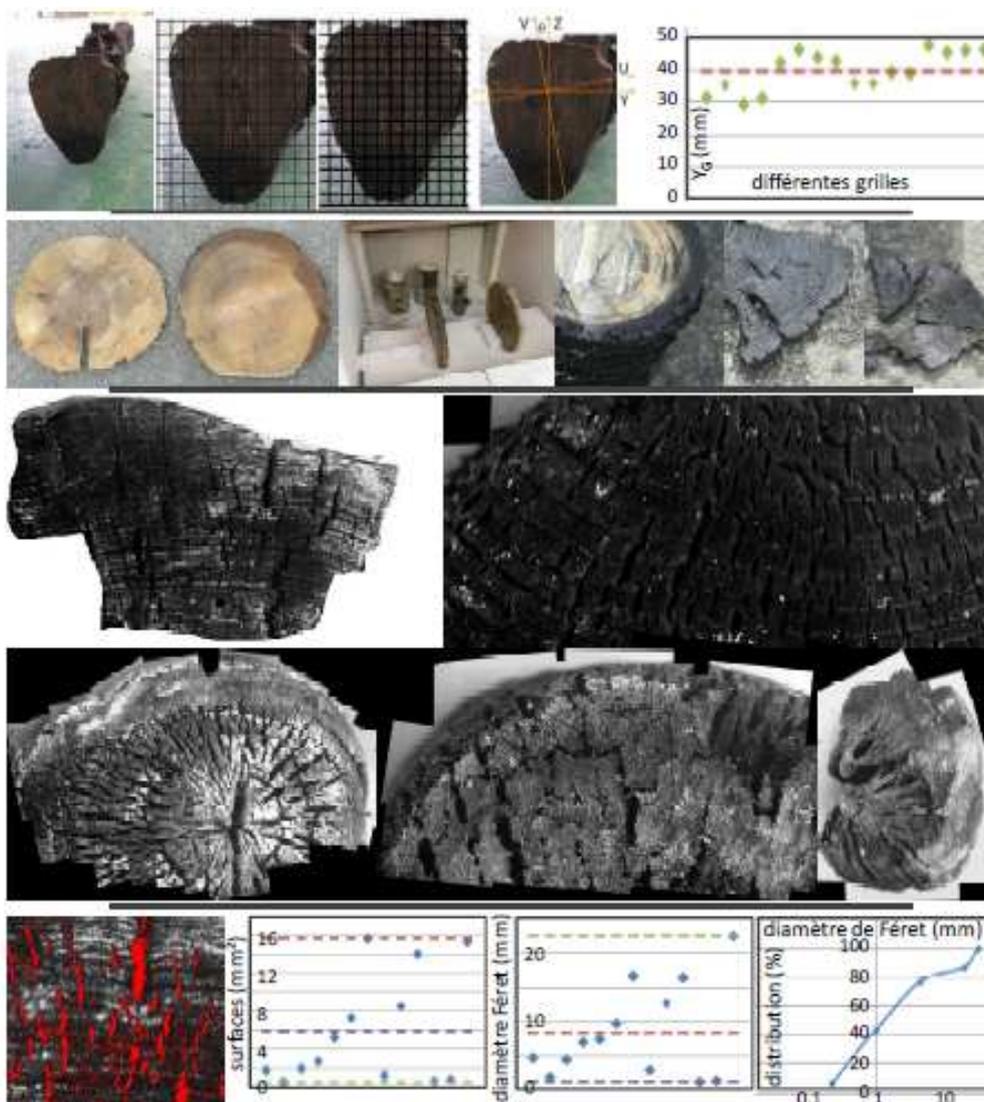


Fig. 1 : Quelques étapes du travail réalisé

Cette étude montre l'importance des réglages des outils utilisés sur les résultats obtenus par analyse d'image. Ces outils sont performants, mais leur utilisation est difficilement automatisable. Sous réserve de précautions et vérifications présentées dans ce travail, les résultats obtenus sont intéressants et présentent de nombreuses perspectives de poursuite.

D10

**Comportement mécanique de l'Okoumé (*Aucoumea Klaineana* Pierre) sous sollicitation cyclique en compression.**

PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman<sup>1</sup>, IKOGOU Samuel<sup>1</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>2,3,4</sup>, EKOMY ANGO Serge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon

<sup>2</sup>Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST), IRT, Libreville, Gabon

<sup>3</sup>Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup>CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, Aubière, France  
[rostand.moutou\\_pitti@univ-bpclermont.fr](mailto:rostand.moutou_pitti@univ-bpclermont.fr)

**Mots clefs :** Sollicitation cyclique en compression, Okoumé, bois tropical, expérimentation

**Introduction**

Il a été démontré que le comportement mécanique du matériau dépendait de l'histoire de son chargement et que dans la plupart des cas, ce sont les programmes expérimentaux qui produisent les résultats pour les études entreprises. Aussi, le comportement mécanique des bois tropicaux, sous sollicitation cyclique en compression, n'a pas encore été suffisamment étudié à ce jour, cependant beaucoup de travaux similaires ont été menés sur les matériaux tels que le béton [1] et l'acier [2]. Le but de ces travaux est d'étudier le comportement rhéologique, tant en charge monotone que cyclique de l'Okoumé abondamment utilisé aussi bien en construction qu'en produits finis ou semi-finis. Le travail présenté ici, porte sur l'étude expérimentale des éprouvettes d'okoumé normalisé ASTM-D-143 [3].

**Matériels et méthodes**

Des éprouvettes d'Okoumé de dimensions 50×50×200mm soumises à des taux d'humidité de 12±4% ont été testées sur une presse "United Testing Machine " de 100kN de capacité maximale pourvue d'un centralisateur qui assure l'enregistrement des informations.

En premier lieu, des essais de charge en compression monotone ont été réalisés sur 15 éprouvettes, afin d'obtenir : le module d'élasticité ( $E_L^E$ ), la contrainte maximale de rupture ( $\sigma_{1,max}^T$ ), la contrainte de limite d'élasticité ( $\sigma_L^E$ ), la déformation du point de rupture ( $\epsilon_{1,max}^T$ ) et la déformation à limite élastique ( $\epsilon_L^E$ ). Des essais cycliques sont ensuite réalisés sur 6 éprouvettes. Ces éprouvettes ont été chacune chargées 5 fois suivant l'axe des fibres, sous une vitesse de 0,45mm·s<sup>-1</sup>. Les forces imposées (Tab. 1) ont été choisies aléatoirement, de manière croissante dans la zone élastique, l'objectif étant de rester dans cette zone et d'éviter les premiers bris du matériau.

Tab. 1 : Forces maximales utilisées pour chaque cycle de charge

cycles	1	2	3	4	5
Forces (N)	12000	18000	24000	32000	38000

**Résultats et discussion**

La Figure 1 présente le comportement mécanique de l'okoumé sous un chargement cyclique en compression. On remarque la présence des déformations permanentes se formant pour des forces de charge inférieures à 50% de la force de la limite élastique, obtenu lors du chargement monotone.

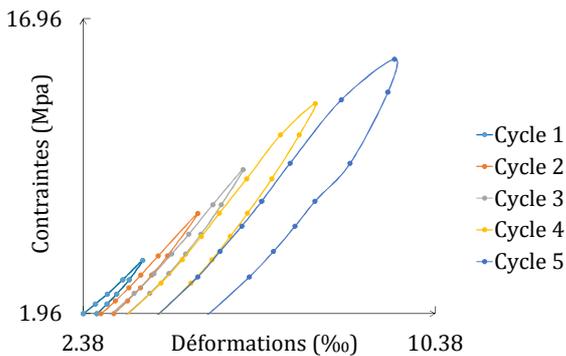


Fig. 1 : Courbe typique du comportement mécanique de l'Okoumé sous sollicitation cyclique en compression

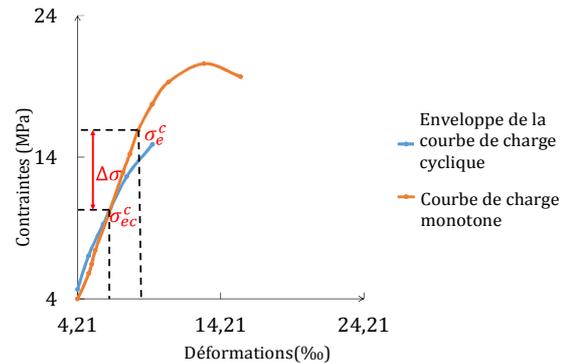


Fig. 2 : Comparaison entre l'enveloppe de la courbe du chargement cyclique et celle du chargement monotone

La figure 2 met en évidence le début de la perte de rigidité de l'Okoumé en charge cyclique. Cette limite est déterminée par l'intersection des enveloppes des courbes, des charges monotone et cyclique. La comparaison des deux contraintes des limites élastiques cyclique et monotone montre :

$$\sigma_{ec}^c = \sigma_e^c (1 - \Delta\sigma) \quad (1)$$

Où  $\Delta\sigma > 30\%$ ,  $\theta = \frac{1}{1 - \Delta\sigma}$  est le facteur de sécurité déterminé expérimentalement et de valeur  $\theta = 1.515$ ;  $\Delta\sigma$  est le taux de variation de la perte de rigidité.  $\sigma_{ec}^c$  est la limite élastique en compression cyclique.

### Conclusion et perspectives

L'Okoumé perd plus de 30% de sa capacité de résistance sous un chargement cyclique, la détérioration est plus rapide en chargement cyclique qu'en chargement monotone. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par [4] qui stipulent que d'après l'EUROCODE 5 [5] sous un chargement cyclique les assemblages perdent 30% de leur résistance mécanique. A l'avenir, pour avoir des résultats optimums, il serait intéressant de poursuivre cette étude expérimentale en soumettant les éprouvettes d'Okoumé à d'autres sollicitations notamment la flexion. Les résultats obtenus devraient permettre de développer un modèle prédictif, tant sur le plan pratique que théorique, de cette essence.

### Références

- [1] Aslani, F. (2012). Stress-strain model for concrete under cyclic loading. Magazine of concrete research, Volume 64, n° 8.
- [2] Mohammed, B.B. (2010). Modélisation du comportement cyclique alterné du béton armé : applications à divers essais statiques de poteaux. 2010. Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées.
- [3] ASTM-D-143. ANNUAL BOOK of A.S.T.M. American Society for Testing Materials.
- [4] Moura De Melo, J.D. (1996). Utilisation en structures des résineux à faible densité: Conséquences technologiques de scénarios sylvicoles extrêmes. Thèse de l'Université Henri Poincaré-Nancy I.

D11

## Identification du comportement anisotrope du bois par comparaison calcul éléments finis et analyse d'images

MAKHLOUF Heba<sup>1,2</sup>, CHEVALIER Luc<sup>1</sup>, NGUYEN Truong Thi<sup>1</sup>, LAUNAY Eric<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Echelle, MSME UMR 8208 CNRS, Université Paris-Est

<sup>2</sup>Institut technologique Forêt Cellulose Bois-Construction Ameublement, FCBA, Champs sur Marne

[heba.makhloufhaidar@u-pem.fr](mailto:heba.makhloufhaidar@u-pem.fr)

**Mots clés :** Comportement anisotrope, Corrélation d'images, Epicéa, Finite Element Model Updating, Identification

### Introduction : de la nécessité de l'identification

Le travail présenté rentre dans le cadre du développement d'un outil de simulation numérique adapté à l'industrie du meuble prenant en compte à la fois l'incertitude sur le comportement du bois et les particularités géométriques des éléments du meuble (poutres, plaques) - voir Makhlof *et al.* (2015). Dans ce contexte, une étude multi-échelle a été présentée au GRD Bois en 2014 ou dans Chevalier *et al.* (2013, 2014). Elle exploite les résultats d'un calcul éléments finis 3D sur un coin entre un montant et une traverse en épicea afin d'identifier l'effet local du contact et l'influence des éléments d'assemblages. Le calcul 3D nécessite de connaître le comportement anisotrope du bois : il a été retenu un essai classique de flexion 3 points - voir Yoshihara *et al.* (2006). A été utilisée ici la méthode FEMU (Finite element model updating) présentée dans Hild *et al.* (2006) pour le dépouillement de cet essai, ce qui complète l'identification classique des modules longitudinal  $E_l$  et de cisaillement  $G_{lt}$ . Ces deux étapes exploitent la corrélation d'images - voir Chevalier *et al.* (2001) par exemple.

### Flexion 3 points, identification des modules $E_l$ et $G_{lt}$

Des essais de flexion sont réalisés sur des échantillons d'épicéa de 20x20x220 mm (Fig.1). En minimisant l'écart entre la solution analytique issue de la théorie des poutres avec les déplacements mesurés par analyse d'images, sont déterminées les grandeurs  $E_l = 15390$  MPa et  $G_{lt} = 455$  MPa ainsi que leur dispersion de 23% d'un essai à l'autre. Bien qu'un peu élevées, ces valeurs sont conformes à la bibliographie, par exemple dans Winandy (1994).



Fig. 1 : Description de l'essai

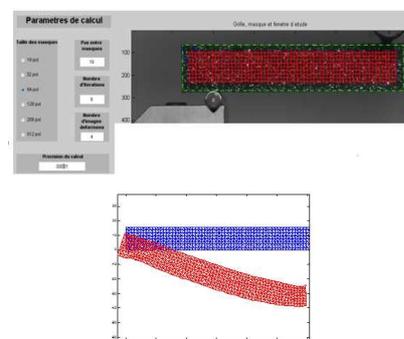


Fig. 2 : Zone retenue pour l'identification

### Méthode FEMU, identification des paramètres complémentaires $E_t$ et $\nu_{lt}$

La méthode FEMU consiste à identifier les paramètres d'un modèle donné en minimisant l'écart entre les résultats d'un calcul par éléments finis (déplacement  $\overline{u}_{FE}$  indicé FE comme

« Finite Element ») avec ceux obtenus par analyse d'images ( $\overline{u_{DIC}}$  et  $\overline{u_{DIC}}$ ) DIC comme « Digital Image Correlation ». L'ensemble de l'image est exploitée, l'hétérogénéité des déplacements près des points d'appuis devient un avantage. Lors de la simulation FE, on impose les mêmes déplacements que ceux obtenus par la DIC sur le bord du domaine d'étude. On n'impose que des conditions en déplacement dans le calcul FE aussi, les paramètres obtenus ne le seront qu'à une raideur près. En faisant varier les valeurs des paramètres  $\alpha$  ( $E_t/E_l$ ,  $G_{lt}/E_l$ ,  $\nu_{lt}$ ) du modèle on recherche la valeur minimale de  $J$  défini par :

$$J(\alpha) = \int_{\Omega} \left( \overline{u_{DIC}}(\vec{x}) - \overline{u_{FE}}(\vec{x}, \alpha) \right)^2 d\Omega$$

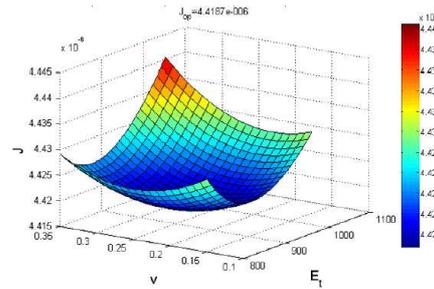


Fig. 3 : : Allure de la fonctionnelle J

Les rapports obtenus  $E_t/E_l = 0,077$ ,  $G_{lt}/E_l = 0,072$  et la valeur de  $\nu_{lt} = 0,23$  sont légèrement différents de ceux présentés Winandy (1994). Par exemple, la valeur identifiée du rapport  $E_t/E_l$  est plus proche de celle du rapport  $E_r/E_l$  de la bibliographie : une conséquence de l'hypothèse d'isotropie transverse qui a été faite dans cette étude (i.e.  $E_r = E_t$ ).

### Conclusion : une démarche simple pour une identification globale

La combinaison des deux méthodes permet une identification globale du modèle orthotrope à partir d'un seul test de flexion 3 points très facile à mettre en œuvre. Une approche semi analytique qui exploite le champ régulier loin des zones d'appui de la poutre et une approche numérique FEMU qui complète ces paramètres en minimisant l'écart entre mesure et calcul par rapport aux paramètres cherchés donnent accès au comportement *via* un seul essai.

### Références

- Chevalier L., Calloch S., Hild F., Marco Y. (2001) Digital image correlation used to analyse the multiaxial behavior of rubber-like material, Eur. J. Mech. A/Solids 20, 169-187
- Chevalier L., Makhoul H., Jacquet-Faucillon B. (2013,2014). Caractérisation de la rigidité des assemblages d'éléments de meuble par la simulation numérique. Partie 1, Technologie 187:38-51. Partie 2, Technologie 190:32-50.
- Hild F., Roux S., (2006) Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties - a review, Journal compilation Blackwell Publishing Ltd.
- Makhoul H., Chevalier L., Favier E., Launay E. (2015). A stochastic approach for the evaluation of the reliability of wood furniture in an industrial context, accepté pour publication Mechanics and Industry.
- Yoshihara H., Tsunematsu S., (2006), Feasibility of estimation methods for measuring young's modulus of wood by three-point bending test, Materials and Structures, 39:29-36
- Winandy J.E. (1994) Wood properties, USDA-Forest Service, Forest Products Laboratory, pages 549-561

D12

**Vers un recyclage en boucle fermée des déchets en bois massif :  
transformation d'un gisement hétérogène en produits standardisés**

PRIVAT François<sup>1</sup>, IRLE Mark<sup>2</sup>, DEROUBAIX Gérard<sup>1</sup>, BELLONCLE Christophe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut technologique FCBA, Champs-sur-Marne

<sup>2</sup> LIMBHA, Groupe ESB, Nantes

[francois.privat@fcba.fr](mailto:francois.privat@fcba.fr)

**Mots clefs :** CaReWood, déchets de bois, recyclage en boucle fermée, rendement, tri

**Introduction**

Les déchets bois post-consommateurs dans l'EU 27, dont le gisement a été estimé pour l'année 2007 à 55,4 Mm<sup>3</sup>, sont principalement éliminés par enfouissement ou incinération (37%), recyclés en panneaux de particules (33%) ou valorisés énergétiquement (30%) (Mantau *et al.* (2010)). La part réutilisée est marginale et ainsi parmi les modes de traitement significativement utilisés, le plus haut dans la hiérarchie énoncée par la Directive-cadre sur les déchets est le recyclage en boucle ouverte (c'est-à-dire avec une dégradation des propriétés du matériau) sous forme de panneaux de particules.

Le projet européen CaReWood ([carewood.eu](http://carewood.eu)) vise à développer des procédés permettant de recycler les déchets post-consommateurs en bois massif en cherchant à conserver leurs dimensions (boucle quasi-fermée), et à évaluer la rentabilité économique et environnementale.

**Méthode**

En fonction de l'application visée, les produits CaReWood devront évidemment répondre à certaines spécifications volontaires, normatives ou réglementaires, que ce soit en termes biologiques (essences), physiques (dimensions, stabilité dimensionnelle), chimiques (seuils de contamination), mécaniques (rigidités, résistances) ou esthétiques (absence de défauts).

Le procédé CaReWood devra ainsi, à partir d'un gisement hétérogène, maîtriser les principaux paramètres suivants, que ce soit pour les besoins de l'application ou du procédé en lui-même : dimensions et singularités, défauts, essence / densité / rigidité, humidité, contaminations chimiques. Au stade actuel du projet, le procédé CaReWood envisagé peut comprendre différentes étapes : pré-tri et démantèlement, purge des métaux et singularités, sciage en sections rectangulaires et décontamination, purge des défauts, séchage, aboutage par entures multiples ou jointoiement bout-à-bout, contre-collage (Fig. 1). Certaines étapes sont facultatives selon l'application visée et ses spécifications. D'autre part, pour chacune d'elles différents niveaux d'asservissement sont envisageables (Tab. 1).

Tab. 1 : Niveaux d'asservissement envisageables pour la maîtrise des paramètres et illustration pour l'humidité (celle-ci doit être maîtrisée pour assurer un collage correct des pièces et une stabilité dimensionnelle conforme aux spécifications)

	Sélectif	Transformatif
Sans détection	Restreindre le gisement et adapter le procédé (cibler les déchets d'emballage uniquement et choisir un adhésif adapté à l'humidité moyenne)	Utiliser un procédé auto-ajustant (sécher tous les déchets)
Avec détection	Trier et écarter les refus (écarter les déchets dont l'humidité ne correspond pas)	Détecter les variations et ajuster le procédé (sécher les déchets dont l'humidité ne correspond pas)

Les procédés transformatifs permettent de meilleurs rendements par rapport aux procédés sélectifs mais impliquent généralement des coûts d'investissement et de fonctionnement supérieurs. La détection (visuelle ou à l'aide de capteurs) est utilisée pour des procédés sélectifs (tri) ou transformatifs (ajustement d'un procédé en temps réel ou par lot). Dans le deuxième cas, elle permet d'améliorer la flexibilité et l'efficacité du procédé mais ajoute des coûts d'investissement et de fonctionnement. De plus, lorsque le procédé est ajusté par lot, des coûts logistiques s'ajoutent. Par exemple, le sciage des pièces de bois en lamelles peut s'effectuer de manière indifférenciée avec des dimensions de lamelles optimisées pour l'ensemble du gisement, ou successivement sur différentes bennes pré-triées par section avec des dimensions de lamelles optimisées pour chacune des classes de sections. La seconde option améliore le rendement global (Irle (2015)), mais nécessite l'utilisation de plusieurs bennes pour stocker temporairement les pièces pré-triées. Pour chaque critère supplémentaire, le nombre total de bennes est multiplié par le nombre de classes retenu pour ce critère.

Les choix d'étapes et de niveaux d'asservissement décrits par la Fig. 1 permettent d'atteindre un rendement et des spécifications relativement élevées. Toutefois, la rentabilité économique du procédé est questionnable. Ces choix vont donc faire l'objet d'une optimisation en estimant les rendements atteignables et en confrontant systématiquement les recettes attendues (spécifications atteignables, prix de vente du produit) aux coûts d'investissement et de fonctionnement (matière première, transports, procédés, main d'œuvre, gestion des refus).

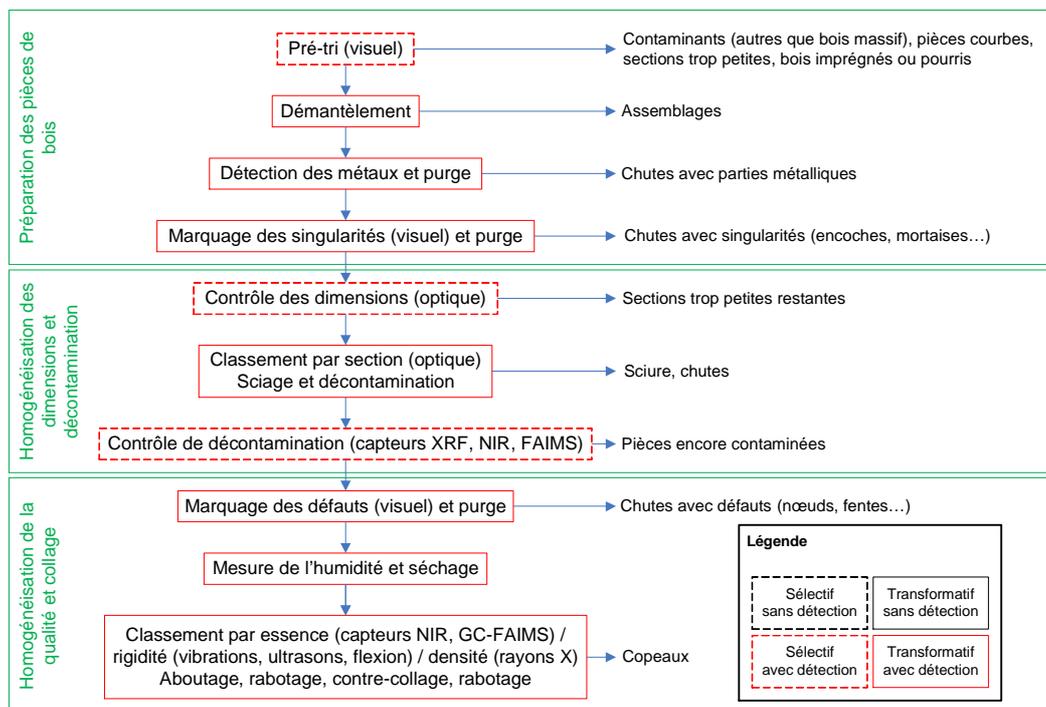


Fig. 1 : Procédé CaReWood envisagé pour atteindre un rendement et des spécifications relativement élevées

## Références

- Irle M., Privat F., Deroubaix G., Belloncle C. (2015), Intelligent recycling of solid wood, 10th International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium", Brasov, Romania
- Mantau U. et al. (2010), EUwood – Real potential for changes in growth and use of EU forests – Final report, 160 pp.

## Developing new and innovative design principles of wood plastic composite using Innovization techniques

HOBBALLAH Mohamad<sup>1,2</sup>, NDIAYE Amadou<sup>2</sup>, IRLE Mark<sup>1</sup>, MICHAUD Franck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIMBHA, Groupe ESB, Nantes

<sup>2</sup>INRA, I2M Bordeaux

Mohamad-hussein.hobballah@ecoledubois.fr

**Keywords:** Multi-objective Optimization, Innovization, Wood plastic composite, PSO

### Introduction

The manufacture of composites based on wood is an important contributor to the French economy. The 2014-15 Annual report of the European Panels Federation indicates that France produce over 5.5 million m<sup>3</sup> of panel products in 2014. Even so, developing new products and optimizing existing ones raises the questions: how to tune production process variables and what raw materials are most likely to give the optimal output. In this context, several studies (Soury *et al.*, 2009) have used optimization techniques to find the best design that would maximize the performance of wood composite products, at the same time minimize their weaknesses and costs.

Some of the previous research has used multi-objective algorithms to find Pareto-optimal compromise solutions that form a Pareto Front. This front shows the best compromises that could be reached between two extremes, high cost/performance and low cost/performance product. The number of proposed solutions can be huge and choosing a solution is generally guided by decision makers

In fact, many drawbacks may occur when using optimization techniques to select one single optimal solution: 1) optimization algorithms are very sensitive to the optimization problem, so that any slight change in the objective function, variables intervals, constants, etc. will often have a huge impact on the final results; so unless you are working in a research and development section in a company where there is no confidentiality issues, many things will be changed in the problem formulation and thus the final results will not be so useful; 2) the introduction of the costs in the process of optimization will compromise between performance and price, and thus concealing high performance solutions, should they exist, that may be very interesting for industrialists and could encourage them to explore new design areas; 3) also such research does not provide a deeper understanding of wood product design issues.

The approach adopted in this paper is to address the optimal solutions as a whole and to not look for a single optimal solution; this may give a better understanding of what makes these solutions optimal even though they can have very different combinations of design variables. This understanding will help develop design principles called Innovization (Deb *et al.*, 2006) that could be more helpful to industrialists compared to a single solution.

### Methodology

Innovization is a new design methodology introduced by Deb *et al.* (2006), in the context of finding new and innovative design principles by means of multi-objective optimization techniques. The methodology can be summarized as follows: i/ fix the design variables and the objectives of the optimization, no economic or geometric objective to be optimized, just the performance; ii/ choose the proper optimization algorithm with taking into consideration the linearity of the problem and the types of design variables; iii/ optimizing and obtaining the

Pareto front iv/ analyze the results and find relationships and rules that could develop design principles.

As a test case, the equations proposed by Michaud *et al.* (2009) for wood-plastic composites have been chosen. The optimization problem consists of three objectives to be minimized: creep, swelling and use of fossil resources. Eleven design variables of the composite formulation are considered: fiber ratio, additives ratio, matrix ratio, virgin and recycled fiber ratios in fiber component, other reinforcement ratio in fiber component, thermoplastic, biopolymer and recycled thermoplastic ratios in matrix, fiber size distribution and fiber treatment factors.

Due to the type of variables, continuous and discrete, and the non-linearity of the problem, multi-objective Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm (Hu *et al.*, 2002) were applied to establish the Pareto front (fig. 1 and 2). Analyzing the Pareto-optimal solutions generated the following rules: use 100% biopolymer ratio in matrix component, always use treated or untreated fiber with high size distribution factor. These variables were common among all optimal solutions. Any violation of the design principles will induce a waste of resources, time and effort. These results were found to be very important for the industrialists. For example, limiting the fiber treatment factor to two choices: strongly treated or untreated, thus eliminating the other choices, because the results proved that they could not give Pareto-optimal solutions, would reduce the possible loss, the quality control requirements and the need for specified labors.

The Innovization methodology can be applied to any manufacturing process.

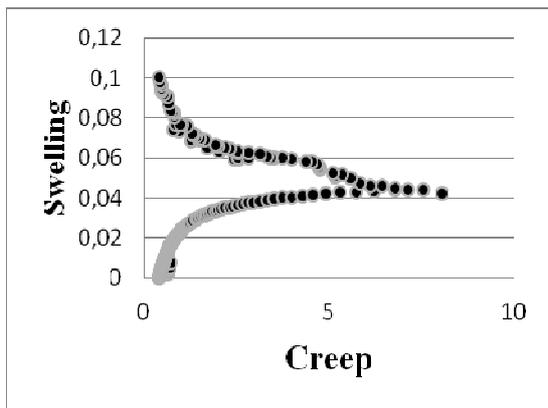


Fig. 1 : Pareto Creep-Swelling

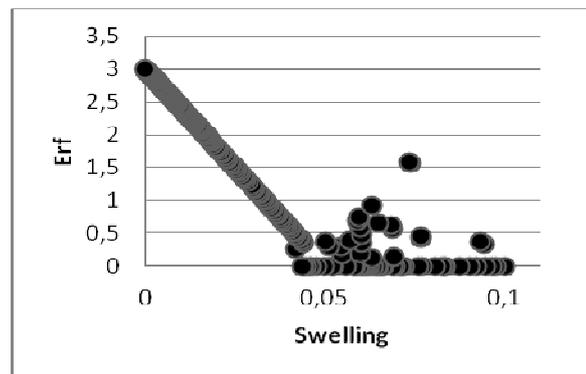


Fig. 2 : Pareto Swelling-Erf

## References

- Deb, K. and A. Srinivasan (2006). Innovization: innovating design principles through optimization. Proc. 8<sup>th</sup> annual conf. on Genetic and evolutionary computation: 1629-1636.
- Hu, X. and R. Eberhart (2002). Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization. Proc. Congress on Evolutionary Computation: 1677-1681.
- Michaud, F., P. Castéra, C. Fernandez and A. Ndiaye (2009). "Meta-heuristic Methods Applied to the Design of Wood-Plastic Composites, with Some Attention to Environmental Aspects." *Journal of Composite Materials* **43**(5): 533-548.
- Soury, E., A. H. Behraves, E. Rouhani Esfahani and A. Zolfaghari (2009). "Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet." *Materials & Design* **30**(10): 4183-4191.

D14

## Optimisation multi objectifs d'un isolant à base de fibres de bois.

MICHAUD Franck<sup>1</sup>, HOBALLAH Mohamad<sup>1</sup>, NDIAYE Amadou<sup>2</sup>,  
IRLE Mark<sup>1</sup>, Jérôme MOREAU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIMBHA, Groupe ESB, Nantes

<sup>2</sup>Departement CEPIA, INRA Bordeaux  
Franck.Michaud@ecoledubois.fr

**Mots clefs :** isolants, non-tissés, fibres de bois, optimisation, multi objectifs

### Introduction

En France la ressource fibreuse lignocellulosique reste sous utilisée dans le secteur de la construction dominé par les produits minéraux ou dérivés de la pétrochimie. Cependant de nouvelles tendances émergent des pays du Nord de l'Europe et de l'Amérique avec l'apparition de jeunes industries promulguant le développement de produits plus vertueux en termes d'environnement et énergie. En 2012, le marché de l'isolation en France représentait 1,3 Milliard d'euros. Les produits isolants à base de fibres de bois représentait 2,3% de ce marché mais une croissance annuel estimée à 10% jusqu'en 2020 Alcimed (2012). Les conditions du succès passent par la sécurisation des produits et leur compétitivité. A ce jour les produits bois sont en moyenne 2 fois plus onéreux, il convient donc d'optimiser simultanément la performance économique et technique de ces derniers tout en assurant un produit à faible impact environnemental. C'est donc au sein du projet ECOMATFIB (financé par l'ADEME) que nous proposons la démarche d'optimisation qui suit.

### Méthode

La méthodologie proposée se traduit par le schéma de la figure 1. Le but est de pouvoir développer des matériaux à base de fibres de bois, nouveaux ou existants, possédant des performances optimisées. Il est donc question de s'intéresser à différents niveaux :

- la conception (matières premières, organisation de la structure fibreuse)
- les procédés de fabrication, la caractérisation
- et plus particulièrement l'optimisation avec des méthodes multi objectifs.

La première étape de la démarche est de produire et compiler la connaissance nécessaire à l'optimisation. Cela implique de définir les performances à optimiser et à les relier à différentes variables (grandeurs physiques, paramètres du procédé de fabrication, caractéristiques techniques...). La tâche dévolue au travail d'optimisation consiste à recueillir ces connaissances auprès des experts : sur la base d'entretiens, de travaux de modélisation et d'expérimentation, de construction de graphes d'influence, pour aboutir à la formalisation des fonctions objectifs, de leurs variables et les contraintes associées.

La seconde étape consiste à utiliser la méthode d'optimisation multi objectif la plus efficiente et adaptée au problème. A ce stade d'avancement du projet les méthodes du type essaim particulière sont de bons candidats à la résolution d'optimisation complexe présentant des données hétérogènes et des objectifs contradictoires et non hiérarchisées (voir Michaud et al (2009)). Cette étape conduit à l'obtention d'optimum au sens du front de Pareto.

Une dernière étape est nécessaire afin d'aboutir à une solution optimale qui sera validée par l'expérimentation. Il est question d'intégrer un outil de décision multicritères à même d'extraire de l'ensemble des solutions optimales, la solution rencontrant les attentes des acteurs du projet (performances économiques, techniques, règlementaires, faisabilité...).

Cette démarche est itérative, chaque progression peut conduire à questionner les modèles, les contraintes, les technologies, les matériaux, le travail expérimental... Ainsi faisant, la démarche : confronte les avis des experts du domaine, combine leurs savoirs en ouvrant de nouvelles perspectives, et aboutit à une meilleure compréhension de la problématique.

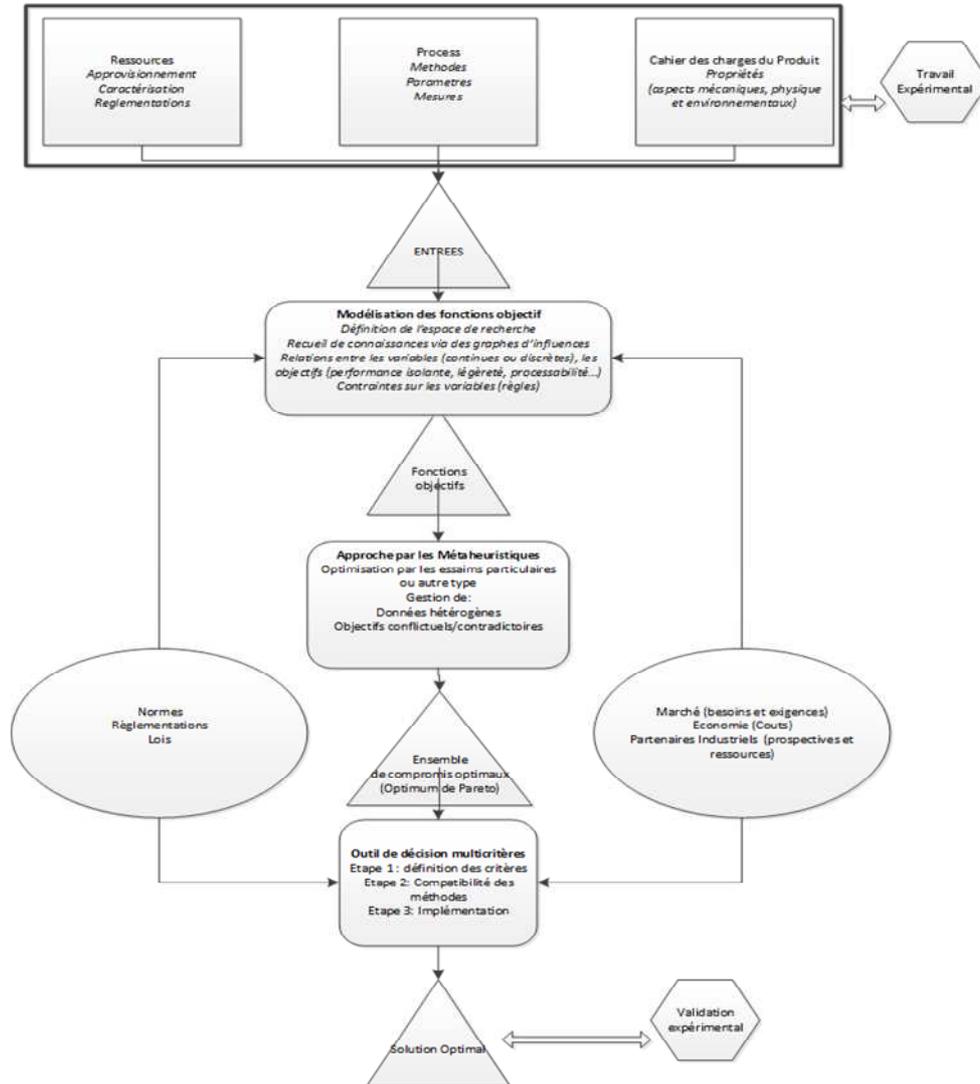


Fig. 1 : Démarche globale d'optimisation et conception d'un nouveau matériau

## Références

Alcimed (2012): Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, Dgcis prospective. rapport PIPAME.

Michaud F., Castera P., Fernandez C., Ndiaye A. (2009): Meta-heuristic methods applied to the design of wood-plastic composites, with some attention to environmental aspects. Journal of Composites Materials, 43(5).

D15

## Suivi de structures en bois en environnement variable via le monitoring

SORIN Edouard<sup>1</sup>, LANATA Francesca<sup>2</sup>, BOUDAUD Clément<sup>2</sup>

<sup>1</sup>I2M, Université de Bordeaux

<sup>2</sup> LUNAM Université, Ecole Supérieure du Bois (ESB), Nantes

[edouard.sorin@etu.ecoledubois.fr](mailto:edouard.sorin@etu.ecoledubois.fr)

**Mots clefs :** Structures en bois, taux d'humidité, modélisation, monitoring

### Introduction

Depuis quelques dizaines d'années le bois est de plus en plus utilisé pour des constructions de plus en plus grandes et complexes. Et cela pour plusieurs raisons : ses caractéristiques mécaniques, thermiques, environnementales et esthétiques en font un matériau idéal pour lutter contre le réchauffement climatique.

Cependant il ne faut pas oublier que le bois est un matériau hétérogène, anisotropique et hygroscopique dont le comportement en environnement variable à long terme reste très difficile à prévoir.

C'est pourquoi ce travail traite de l'évolution du comportement d'une structure en bois en environnement variable, l'extension de « l'Ecole Supérieure du Bois », à Nantes, qui est monitorée depuis Juillet 2012. L'objectif de ce travail est de comprendre l'impact des variations environnementales sur le comportement global de la structure, en modélisant l'évolution du taux d'humidité au sein des sections de chaque élément de structure.

### Mesures à long terme

La structure monitorée mesure 45m de long, 13m de large, et supporte un porte-à-faux de 9m. Elle est composée de deux doubles treillis, les éléments de structure travaillent donc principalement en traction et compression. La plupart des éléments de structures sont à l'intérieur, mais une partie de la structure est soumise au climat extérieur.

Le monitoring de cette structure consiste à mesurer l'évolution de la déformation longitudinale de certains éléments, en utilisant des jauges couplées avec des capteurs hygro-thermiques, pour obtenir l'évolution de la température et de l'humidité relative au niveau des jauges. Les déformations longitudinales sont relevées toutes les 6 heures, alors que la température et l'humidité relative sont relevées toutes les minutes.

L'observation des données montre qu'un état transitoire apparaît au début du monitoring, état qui semble lié à la transition entre le taux d'humidité initial du bois, à 12%, et le taux d'humidité actuel, aux alentours de 8%, pour la partie intérieure. Cette phase est suivie par un état pseudo-stationnaire. Des corrélations effectuées entre la déformation et les variations de température/humidité montrent que l'évolution de la déformation longitudinale est très fortement liée à l'évolution de l'humidité dans les éléments de structure.

### De la mesure au modèle numérique

Afin de comprendre l'impact des variations d'humidité sur la déformation longitudinale d'éléments de structure en bois, il est nécessaire d'identifier certains phénomènes liés à l'évolution de l'humidité au sein du bois. La littérature a permis d'identifier trois phénomènes ayant un impact sur le comportement mécanique du bois : la mécano-sorption, le fluage et le phénomène d'hygro-verrou. Toutefois le chargement a également un impact sur la diffusion de l'eau au sein du bois. L'impact de ces phénomènes ne peut donc pas directement être

comparé aux mesures effectuées sur du bois en service. De plus le gonflement du bois dû aux variations d'humidité, qui impacte uniquement la géométrie, crée des déformations si importantes qu'il n'est pas possible d'identifier d'autres phénomènes ; c'est pourquoi elles doivent être modélisées numériquement, afin de pouvoir continuer l'interprétation des données.

Le modèle numérique utilisé a été développé sur le logiciel ANSYS. Le modèle de diffusion de l'eau utilise le module de diffusion thermique déjà présent dans ANSYS. Ce qui a permis de réduire fortement le temps de développement, mais a créé quelques imperfections, car il n'a pas été possible de prendre en compte le phénomène d'hystérésis. L'évolution de la déformation de chaque élément de structure a été modélisée à partir des valeurs d'humidité mesurées. La comparaison entre le modèle et les mesures est montrée Figure 1

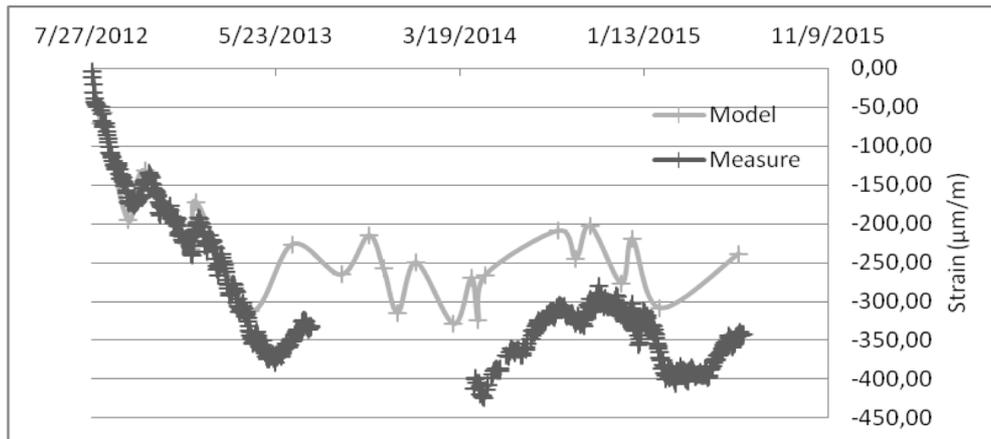


Fig. 1 : Comparaison entre la déformation mesurée et la déformation obtenue par la modélisation pour un élément de structure

Comme on peut le voir sur la Figure 1, durant les premiers mois d'exploitation, le modèle suit très bien l'évolution réelle de la déformation. Cependant entre Février et Mai 2013, un écart apparaît entre le modèle et les mesures ; cette date correspond à de nombreux cracks audibles qui sont apparus au sein de la structure, probablement dus à des contraintes induites par la variation d'humidité au sein des sections, toutefois cela n'a pas encore été prouvé. Quoiqu'il en soit, la pertinence de ce modèle prouve que le retrait-gonflement du bois a un impact si important qu'il doit être filtré, afin de pouvoir identifier d'autres phénomènes ayant un impact sur le comportement mécanique de la structure. Ceci explique également pourquoi la déformation mesurée est si fortement liée à l'évolution de l'humidité au sein d'une section d'élément de structure.

## Conclusion

Le monitoring effectué sur une longue période a permis d'observer que l'évolution de la déformation des éléments de la structure était fortement liée à la variation du taux d'humidité au sein des sections des éléments. Un premier modèle de la déformation due au retrait-gonflement a été développé et comparé à la déformation mesurée sur les éléments monitorés. Toutefois, il reste beaucoup de travail avant de pouvoir comprendre comment les structures en bois se comportent en environnement variable ; des études pourraient être menées à l'échelle d'éléments de structure, sur l'évolution de la rigidité due à l'évolution de l'humidité, sur la diffusion de l'eau au sein d'une section en bois sous chargement variable, et enfin sur le fluage.

Le monitoring de « l'Ecole Supérieure du Bois » est une grande opportunité pour développer des modèles de comportement de structure en bois en service sous climat variable.

D16

## Caractérisation de l'état de surface du bois usiné pour un collage acceptable

RAMANAKOTO Miora<sup>1</sup>, EYMA Florent<sup>1</sup>, RAMANANANTOANDRO Tahiana<sup>2</sup>,  
GEISLER Jérémy<sup>3</sup>, CASTANIE Bruno<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université Paul Sabatier, Institut Universitaire de Technologie, Département GMP, Laboratoire Institut Clément Ader, Tarbes, France.

<sup>2</sup> Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts, Antananarivo, Madagascar.

<sup>3</sup>Critt-bois Midi-Pyrénées, Cellule de Diffusion Technologique, Radegonde, France.

<sup>4</sup> Institut National des Sciences Appliquées, Département Génie Mécanique, Laboratoire Institut Clément Ader, Toulouse, France.

[miora.ramanakoto@iut-tarbes.fr](mailto:miora.ramanakoto@iut-tarbes.fr)

**Mots clefs :** Usinage, collage, bois lamellé-collé, critères de performance, paramètres d'état de surface, seuil d'acceptabilité

### Contexte de l'étude

Faute de connaissances réelles sur l'état de surface permettant d'avoir un collage optimal, la majorité des entreprises s'imposent une sur-qualité pour améliorer la qualité de surface. Dans la littérature, les études se sont surtout focalisées sur la comparaison de différents procédés d'usinage et de leurs performances au collage (Cool et Hernandez, 2011b). Mais les caractéristiques d'une surface usinée donnant une performance au collage acceptable n'ont pas été clairement identifiées. Dans cette étude, deux objectifs ont été ciblés: (i) identifier les paramètres d'états de surface corrélés avec les critères de performance au collage, (ii) identifier leurs seuils pour caractériser un état de surface donnant une performance acceptable pour une application bois lamellé-collé destiné à des pièces de structure.

### Matériels et méthodes

L'étude a été réalisée sur du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb., C18, humidité de 10 %), couramment utilisé pour fabriquer des poutres lamellé-collées. L'usinage et le collage ont été effectués dans les conditions industrielles. Les surfaces ont été rabotées avec 4 niveaux de vitesse d'avance (60, 80, 100 et 125 m/mn), afin de créer des qualités de surface allant de très dégradées à lisses. Les niveaux des autres paramètres sont fixes et conformes aux réglages utilisés actuellement chez l'industriel. Toutes les surfaces usinées ont été collées à la température ambiante avec de la colle Mélamine Urée Formaldéhyde (grammage de 380g/m<sup>2</sup>). Les bois lamellé-collés ont ensuite été mis sous-pression (10 bars) pendant 24 heures, et ont été stabilisés pendant 7 jours.

Les états de surface des bois usinés ont été caractérisés par 17 paramètres de rugosité et d'ondulation (sRa, sWa, sRa, sWq, sRp, sWp, sRv, sWv, sRk, sRpk, sRvk, Sdr, Sdq, Vvv, Vvc, Vmp, Vmc), mesurés à l'aide d'un appareil optique 3D ALICONA, et par les composantes de l'énergie de surface mesurées via la méthode de Lewis et d'Owens-Wendt.

Deux critères ont été retenus pour évaluer la performance au collage : une bonne adhésion de la colle, évaluée par un essai de cisaillement du joint de collage : pour une performance acceptable des joints de colle, la résistance au cisaillement  $\tau$  doit être supérieure à 6MPa, et dans ce cas, le pourcentage de rupture dans le bois (WF %) doit être supérieure ou égale à 90 % ( $WF \% \geq 144 - (9 \tau)$ ). La durabilité de l'assemblage collé a été évaluée à la fois par un cycle de conditionnement dans l'eau froide/eau bouillante avant un essai cisaillement des joints de

colle (Kuljich et al. 2013), mais aussi par un essai de délamination (NF EN 14080, 2013). Pour une performance acceptable des joints de colle, le pourcentage de délamination totale (Dtot) doit être inférieur ou égale à 4 %.

### Résultats

L'augmentation de la vitesse d'avance a donné une surface de plus en plus rugueuse et ondulée. Une surface présentant une bonne performance à l'adhésion et un collage durable doit avoir peu de pics et de creux sur la surface, avec une pente peu abrupte (Tab.1).

Tab. 1 : Seuils des paramètres d'état de surface corrélés significativement avec les critères de performance : résistance au cisaillement ( $\tau$ ) et pourcentage de délamination totale (Dtot)

Equation	R <sup>2</sup>	Seuil des paramètres d'état de surface pour une performance acceptable du collage
$Sdq = 4.901 - 0.4029 \tau$	0,997	$Sdq \leq 2.48 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
$Sdq = 0.77 * \text{Exp}(-0.16 * Dtot) + 0.37$	0,874	$Sdq \geq 0.8 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
$Sdr = 224.5 - 19.66 \tau$	0,992	$Sdr \leq 106.54 \%$
$Sdr = 35.15 * \text{Exp}(-0.22 * Dtot) + 7.98$	0.887	$Sdr \geq 22.82\%$

La performance des joints de collage diminue après vieillissement (Fig.1). Les surfaces présentant une bonne performance à l'adhésion de la colle, donnent un collage moins durable (Fig.2). En effet ces dernières présentent une surface de cisaillement importante qui est favorable à l'adhésion mécanique, mais présentent moins de surfaces spécifiques de contact avec l'adhésif. Par conséquent, bien que les composantes acides de l'énergie de surface soient plus élevées que les composantes basiques (plus d'ions accepteurs d'électrons), peu de liaisons chimiques se sont formées entre les molécules du bois et l'adhésif (MUF basique donneurs d'électrons), et qui sont facilement rompues par le cycle de vieillissement.

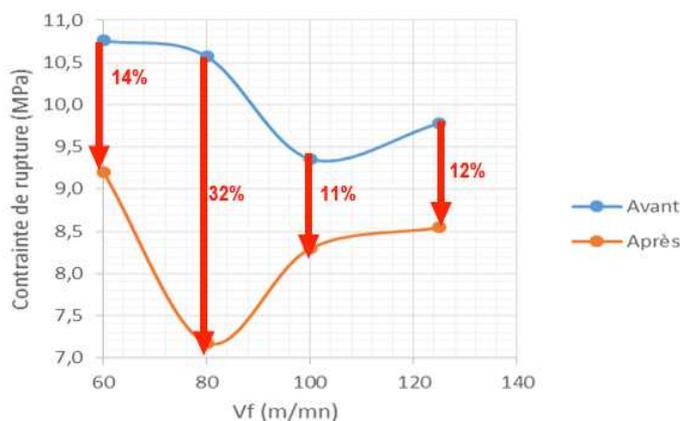


Fig. 1 : Perte d'adhésion suite au vieillissement

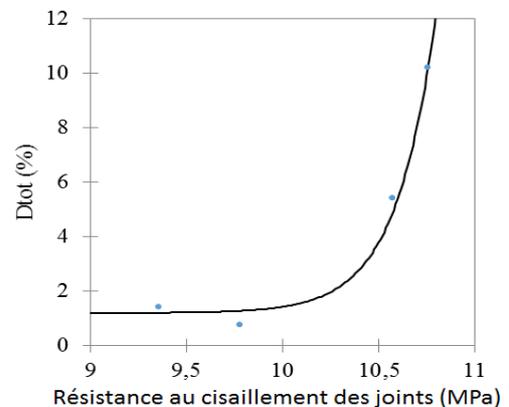


Fig. 2 : Relation entre la performance à l'adhésion et la durabilité du collage

### Références

Cool J, Hernández RE (2011b) Evaluation of four surfacing methods on black spruce wood in relation to polyvinyl acetate gluing performance. Wood and Fiber Science 43(2): 194-205.

Kuljich S, Cool J, Hernández R E (2013) Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance. The Japan Wood Research Society 59: 185-194.

NF EN 14080 (2013). Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements. 108p.

D17

## **Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base du bois.**

YAHYAOUI Imen<sup>1</sup>, PERRIN Marianne<sup>1</sup>, GONG Xiaojing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Clément Ader, IUT de Tarbes, 01 rue Lautréamont, 65000 Tarbes, France  
[imen.yahyaoui@iut-tarbes.fr](mailto:imen.yahyaoui@iut-tarbes.fr), [marianne.perrin@iut-tarbes.fr](mailto:marianne.perrin@iut-tarbes.fr), [xiaojing.gong@iut-tarbes.fr](mailto:xiaojing.gong@iut-tarbes.fr)

**Mots-clefs :** bois, composite, émission acoustique, endommagement, structures mixtes

### **Résumés**

Le bois est le plus vieux matériau utilisé par l'Homme dans des applications structurales telles que la construction des maisons, des ponts, des bateaux et des avions. Malheureusement, suite au développement de nouveaux matériaux de structures tels que les matériaux métalliques (acier notamment) ou le béton, l'utilisation du bois s'est atténuée (Fleury 2006).

Aujourd'hui suite aux problèmes environnementaux et aux problèmes de développement durable, le retour aux matériaux écologiques tels que le bois représente une solution pour diminuer l'intensité de ces problèmes vu sa faible consommation d'énergie. Le bois possède aussi des atouts qui le rendent intéressant pour une utilisation en structure tel que son rapport poids/résistance. Cependant, ce matériau est très sensible à l'humidité et est fortement anisotrope ce qui diminue sa fiabilité. Dans ce cadre, plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité d'associer le bois avec d'autres matériaux afin d'améliorer ses propriétés. En effet, le renforcement du bois avec des composites (polymères renforcés par des fibres) est largement étudié (Lacroix 2000, Gentile 2002, Fiorelli 2003, Borri 2005, Nguyen 2010). Les résultats de ces travaux montrent une amélioration au niveau de la rigidité et de la résistance de la poutre renforcée. Donc, ces structures mixtes sont à la fois originales et mécaniquement très intéressantes, chaque matériau ayant un rôle important dans la performance de la structure.

Le remplacement de matériaux classiques (acier, béton) par ces structures hybrides est motivé par l'allègement de la structure à propriétés mécaniques égales. En revanche l'endommagement de ces structures mixtes n'est pas encore maîtrisé (Nguyen 2010). Dans ce but, il est essentiel de suivre le comportement de ces multi-matériaux collés sous sollicitations afin d'identifier les mécanismes d'endommagement mis en jeu, leur initiation et leur développement jusqu'à rupture.

Afin de répondre à cette problématique, cette étude mettra en valeur les différents mécanismes d'endommagement de ces structures hybrides à l'aide d'une technique de contrôle non-destructif. Une attention particulière sera portée sur l'émission acoustique (EA). Il s'agit d'une méthode est à l'évolution de l'endommagement et qui permet le suivi, la localisation et l'identification des mécanismes d'endommagement. Pour ce faire, on a choisi de travailler sur trois essences de bois (douglas, peuplier et sapin pectiné). Dans un premier lieu on va suivre l'endommagement du bois seul soumis à la traction, la compression et la flexion. L'analyse de la signature acoustique va nous permettre d'identifier les différents modes d'endommagement de ce matériau complexe afin de comparer la réponse acoustique des feuillus et celle des résineux.

## Perspectives

Dans un second temps, on va suivre l'endommagement de deux morceaux de bois collés afin de comprendre l'effet du joint collé sur la signature acoustique. Après on va associer le bois et le composite par un joint collé. La structure mixte va être sollicitée en flexion afin de suivre l'endommagement par émission acoustique, localiser la source émissive et déterminer la chronologie des événements.

La conception et la prévision de la tenue en service de multi-matériaux collés à base du bois nécessitent un outil numérique dont la construction et la validation passent obligatoirement par la compréhension des mécanismes d'endommagement dans la structure. Donc, à terme, cette étude permettra de construire un modèle numérique basé sur le suivi d'endommagement par émission acoustique pour la prévision de la tenue mécanique de ces structures multi-matériaux à base de bois.

## Références

Borri A. (2005), A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites: Part B* 36, 143-153.

Fiorelli J. (2003), Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Material Research* 6, 193-202.

Fleury E, (2006). Le bois dans la construction: étude bibliographique. Champs-sur-Marne : Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Gentile C. (2002), Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. *Journal of composites for construction* 6 (1), 11-20.

Lacroix S. (2000), Etude du renforcement de poutres en bois scié avec des matériaux composites : Mémoire de maîtrise en sciences appliquées. Sherbrooke- Québec-Canada.

Nguyen V. (2010), Multi renforcement du bois lamellé-collé: étude théorique et expérimentale. Thèse de ENPC. Paris.

## Modélisation descriptive de la bioraffinerie lignocellulosique bois

BAUDRIT Cédric<sup>1</sup>, ELAICHOUCI Adil<sup>2</sup>, FERNANDEZ Christophe<sup>1</sup>, NDIAYE Amadou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>I2M, Institut de Mécanique et d'Ingénierie – INRA Bordeaux

<sup>2</sup> ENSC, Ecole Nationale Supérieure de Cognitique Bordeaux

[cedric.baudrit@bordeaux.inra.fr](mailto:cedric.baudrit@bordeaux.inra.fr), [adil.elaichouchi@ensc.fr](mailto:adil.elaichouchi@ensc.fr),

[christophe.fernandez@bordeaux.inra.fr](mailto:christophe.fernandez@bordeaux.inra.fr), [amadou.ndiaye@bordeaux.inra.fr](mailto:amadou.ndiaye@bordeaux.inra.fr)

**Mots clefs :** Intégration des connaissances, modélisation, carte conceptuelle, systèmes complexes, bioraffinerie lignocellulosique.

### Introduction

Il existe une ressource durable en biomasse lignocellulosique forestière provenant de systèmes « socio-écologiques » (couplant production primaire forestière et transformation industrielle du bois) et gérée par de multiples agents à l'échelle locale (territoire, région,...) pour des marchés globaux. L'enjeu de la bio-raffinerie, aujourd'hui, est d'optimiser la valorisation de toutes les composantes et propriétés intrinsèques du bois (cellulose, lignine, hémicellulose, extractibles, minéraux) pour les transformer en énergie et une gamme de co-produits à hautes valeurs ajoutées (synthons, polymères, carburant ...) [1]. Il est capital de comprendre et maîtriser la déconstruction moléculaire du bois afin de rendre accessible la cellulose, les hémicelluloses et les lignines pour la synthèse de nouveaux produits via des bioprocédés socio-économiquement et écologiquement viables. Une des difficultés que rencontre la filière de la biomasse réside dans le fait que la conception intégrée de produits bio-sourcés diversifiée et durable nécessite une coopération entre de nombreuses disciplines (biologie, physique, économie, ingénierie, chimie, informatique, écologie ...) et l'assemblage de différentes expertises qui demeurent encore peu structurée. La fabrication d'un produit ou la conduite de projet industriel ne se limite plus à sa dimension technique mais doit intégrer, dans sa conception, la dimension de durabilité de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Les innovations, modifications et le développement de nouveaux projets seront indéniablement facilités pour ceux qui sauront avoir une vue d'ensemble sur leur système. La mutualisation des connaissances et des savoirs par et entre champs disciplinaires, générera des transferts de méthodes entre disciplines et fera indéniablement émerger de l'innovation. Pour ce faire, il est capital de proposer des approches conceptuelles qui permettent de représenter l'ensemble des acteurs et des éléments fonctionnels en interaction à différents niveaux d'échelles. Le comportement collectif des éléments fonctionnels et leurs interactions engendrent des structures organisées qui influencent en retour des comportements individuels. L'objectif de ce travail est de créer une interface capable de fédérer dans un cadre formel et unificateur la connaissance des scientifiques et le savoir-faire des industriels relative à la bio-raffinerie de la biomasse lignocellulosique du bois.

### Modèle de la bioraffinerie lignocellulosique bois

Une modélisation graphique du modèle de bioraffinerie lignocellulosique bois est proposée (Fig. 1). Chaque entité du modèle, à l'exemple de *Produits ciblés* (voir Fig. 1), peut être reliée par un hyperlien à une carte de connaissance (appelée aussi graphe sémantique) [2] et/ou une carte de processus [3] permettant de décrire de manière formelle chacune d'elle. Chaque carte se compose de concepts interconnectés par des relations ontologiques (taxonomique, méréologique et du domaine) et des hyperliens permettant de descendre dans la granularité de la description des concepts et procédés déclinés.

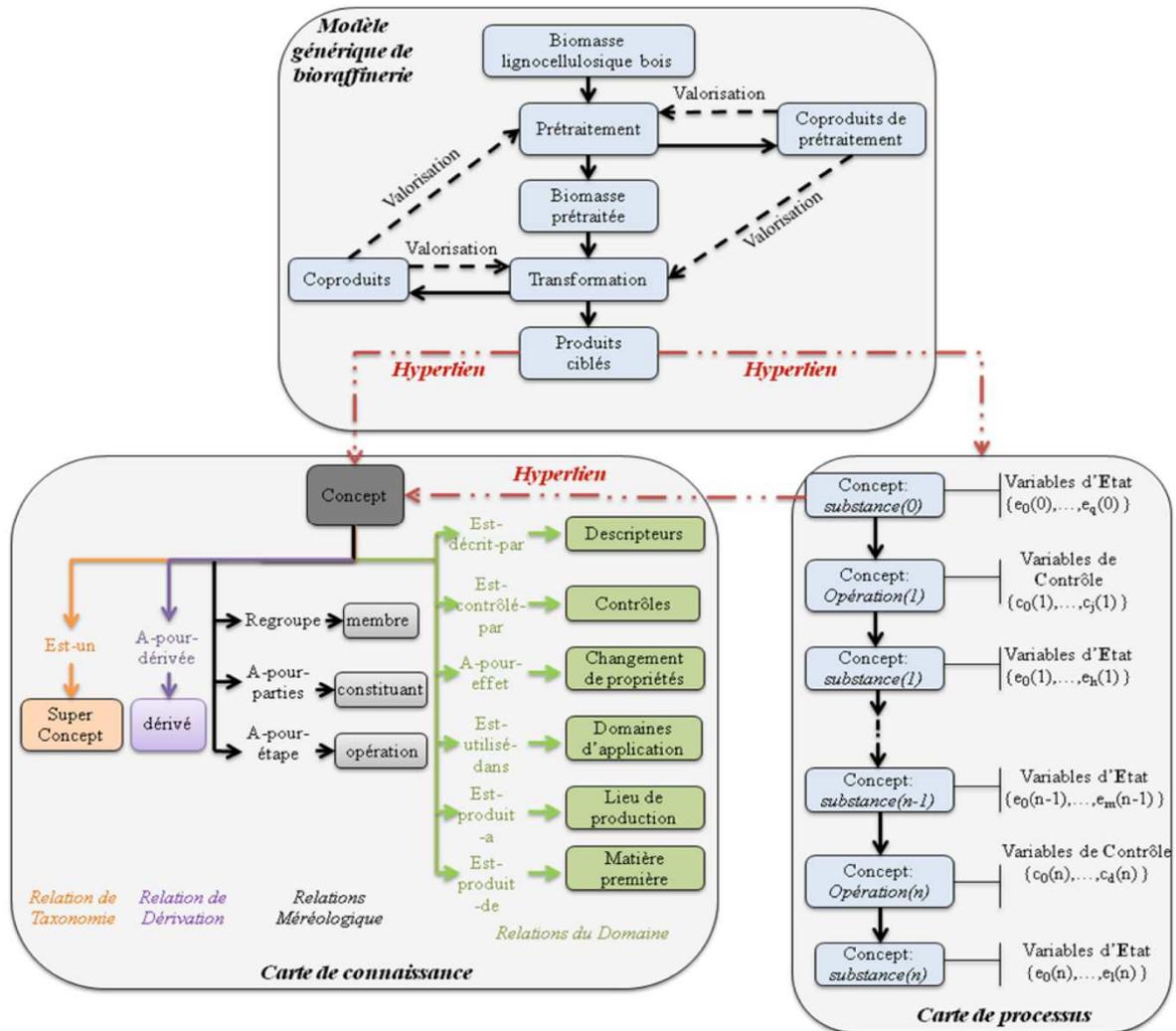


Figure 1 : Modèle de représentation de la bioraffinerie lignocellulosique bois.

## Conclusion et perspectives

L'interface du modèle permet l'assemblage de connaissances hétérogènes multi-sources et multi-échelles dans un cadre formel homogène. Etant muni d'une structure d'algèbre, l'exploitation du graphe permettra, au delà de son aspect descriptif, de faire des choix parmi l'ensemble des résultats possibles suite à l'interrogation des modèles sous-jacents dans le but de faire émerger un potentiel d'éco-innovation (nouvelles stratégies de fabrication, conduites de procédés ou de lever des verrous technico-scientifiques).

## Références

- (1) Gabenisch, A., Maës, J., Mandret, N. (2012) *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*. MAAPRAT- DGPAAT / MINEFI – DGCIS / PIPAME / Cabinet Alcimed.
- (2) Milton, N.R. (2007) *Knowledge acquisition in practice: A step-by-step Guide*. Springer.
- (3) Ndiaye, A., Della Valle, G., Roussel, P. (2009) Qualitative modelling of a multi-step process: The case of French breadmaking. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 1020-1038.

D19

## Comportement sol-structure, application au treuillage d'un arbre

COINTE Alain<sup>1</sup>, COUREAU Jean-Luc<sup>1</sup>, Stéphane Morel<sup>1</sup>, Pauline DEFOSSEZ<sup>2</sup>, Frédéric DANJON<sup>3</sup>, Didier GARRIGOU<sup>2</sup>, Jean-Marc BONNEFOND<sup>2</sup>

<sup>1</sup> I2M-GCE, Université de Bordeaux / CNRS, UMR 5295,  
351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

<sup>2</sup> ISPA, INRA, Bordeaux Science Agro UMR 1391,  
F-33882 Villenave d'Ornon, France

<sup>3</sup> BIOGECO INRA, Université de Bordeaux UMR 1202,  
F-33610 Cestas, France

[jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr](mailto:jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr)

**Mots clefs :** arbre, treuillage, raideur, rupture

### Introduction

L'étude s'est déroulée dans le cadre du projet PEPS ANOSAV. L'objectif de l'investigation expérimentale est de mettre en place in-situ un protocole d'essais statiques, capable de mesurer la complaisance de la structure « arbre-racine » en tenant compte de sa liaison au sol. L'originalité est d'analyser la potentielle adaptation de la rigidité du système racinaire en fonction de la direction des vents dominants. Plusieurs essais sont réalisés selon différentes directions de chargements à des intensités différentes. Dans un second temps, un essai de rupture a été mené dans la direction du vent dominant. Des cycles de charges et décharges sont pratiqués afin de mieux découpler par la mesure, les effets de la flexion du tronc, de la rigidité de la plaque sol-racines. A la suite de cette expérience, les performances mécaniques des racines (module d'élasticité et module de rupture) sont étudiées en fonction de leur localisation dans le système racinaire.

### Protocole d'essais

Pour effectuer des mesures, maîtrisées en termes de chargement et de déplacements, un pin maritime a été écimé pour éviter l'effet de flexion supplémentaire dû au houppier pendant du treuillage. Un tronc d'une quarantaine d'années a donc été sollicité en flexion simple. Différents types de capteurs sont placés pour identifier la rigidité flexionnelle de la tige à celle produite par la rotation potentielle de son pied. Des capteurs à fils permettent de faire l'acquisition des déplacements en tête de tige et des inclinomètres enregistrent les rotations tridimensionnelles en haut et en bas de la tige. Le treuillage est réalisé à partir d'un véhicule de type 4\*4, offrant plusieurs orientations de chargement selon des secteurs angulaires prédéfinis. Les positionnements du treuil du véhicule et des capteurs sont mesurés au tachéomètre afin de bien connaître les axes de sollicitations en fonction des points cardinaux de la parcelle.

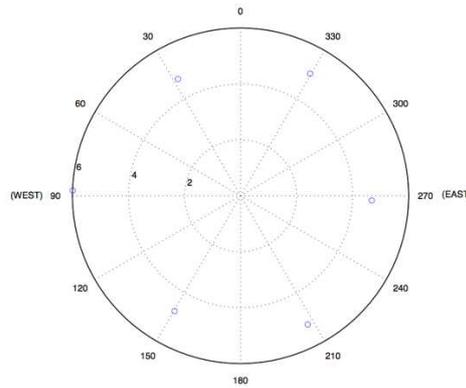


Fig. 1 : Déplacements (mm) selon les six directions de treuillage (consigne de force 2000 daN)

### Protocole d'essais

A la suite des cycles de charges et décharges dans le domaine élastique, la rigidité de l'ancrage racinaire a pu être extraite. On constate une anisotropie de la plaque racine-sol selon la direction de chargement Ouest (FIG 1). Dans les autres directions les rigidités sont identiques. Elles présentent une raideur plus forte de 20% environ. Ces premiers résultats montrent probablement une accommodation offrant le minimum de rigidité de l'ancrage de l'arbre dans la direction opposée au vent dominant.

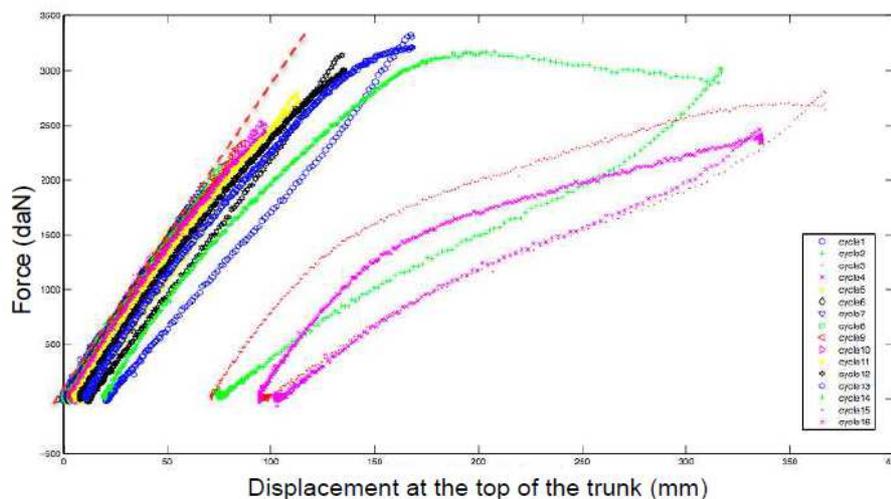


Fig. 2 : Diagramme Force-Flèche jusqu'à la rupture (avec cycles charges et décharges)

Les essais de rupture révèlent un comportement élasto-plastique de la structure (FIG 2). 16 cycles de charge et décharge ont été réalisés dans le sens « Ouest-Est ». Une dégradation marquée de la rigidité du système a été observée au treizième cycle, correspondant à la rupture locale de racines tendues dans le secteur OUEST du plateau racinaire. La plastification du sol semble apparaître au sixième cycle par la présence de déplacements résiduels. L'instabilité globale de l'arbre engendrant le basculement se passe après ces « micro-ruptures ». La caractérisation mécanique des racines, menée sur une autre plaque racine-sol issue de la même station montre que le matériau « d'ancrage » possède une résistance plus élevée de 20% dans le secteur Ouest du système racinaire (direction au vent dominant). Le système racinaire étudié possédait un pivot très développé et un enracinement profond pour la parcelle étudiée.

L'investigation expérimentale a permis de finaliser un protocole d'essais, qui sera développé dans le projet QUALIPIN 2015-2018 (Projet Région Aquitaine).

## PARTICIPANTS

Nom	Institution	Email
Claire ALIX	ArchAm Paris	claire.alix@mae.u-paris10.fr
Tancrede ALMERAS	LMGC Montpellier	tancrede.almeras@umontpellier.fr
Jérôme ALTEYRAC	LabECAM Lyon	Jerome.alteyrac@ecam.fr
Sofiane AMZANE	I. Pascal Clermont-Fd	sofiane.amziane@univ-bpclermont.fr
Anji ANDRIANANTENAINA	LERFoB Nancy	anjy.andrianantenaina@nancy.inra.fr
Nicolas ANGELLIER	GEMH Egletons	Nicolas.angellier@unilim.fr
Haroutioun ASKANIAN	ICCF Clermont-Fd	haroutioun.askanian@ensccf.fr
Philippe AUDEBERT	I. Pascal Montluçon	audebert@moniu.univ-bpclermont.fr
Eric BADEL	PIAF Clermont-Fd	eric.badel@clermont.inra.fr
Tête Sévérien BARIGAH	PIAF Clermont-Fd	Tete.barigah@clermont.inra.fr
Cédric BAUDRIT	I2M/GCE Bordeaux	cedric.baudrit@u-bordeaux.fr
Christophe BELLONCLE	ESB Nantes	christophe.belloncle@ecoledubois.fr
Claire BESSE	LCSN Limoges	claire.besse@etu.unilim.fr
Nicolas BILOT	LERFoB / BEF Nancy	nicolas.bilot@nancy.inra.fr
Marie BONNET	Navier Champs-s-M	Marie.bonnet@enpc.fr
Abdelhamid BOUCHAIR	I. Pascal Clermont-Fd	Abdelhamid.BOUCHAIR@univ-bpclermont.fr
Loïc BRANCHERIAU	BioWooEB Montpellier	Loic.brancheriau@cirad.fr
Nathalie BREDA	EEF Nancy	Nathalie.Breda@nancy.inra.fr
Bernard BREYSSE	PIAF Clermont-Fd	bernard.breysse@educagri.fr
François BROUILLETTE	UQTR Trois-Rivières, CA	francois.brouillette@uqtr.ca
Lydie CAETANO	LIMATB Lorient	lydie.caetano@univ-ubs.fr
Kévin CANDELIER	BioWooEB Montpellier	kevin.candelier@cirad.fr
Sabine CARE	Navier Champs-s-M	sabine.care@ifsttar.fr
Arnaud CHALLANSSONEX	LGPM Châtenay-Malabry	arnaudchallanonnex@gmail.com
Myriam CHAPLAIN	I2M/GCE Bordeaux	Myriam.chaplain@u-bordeaux.fr
Hubert CHAPUIS	LERMaB Nancy	hubert.chapuis@univ-lorraine.fr
Karine CHARLET	I. Pascal Clermont-Fd	Karine.CHARLET@ifma.fr
Bertrand CHARRIER	IPREM Mont de Marsan	bertrand.charrier@univ-pau.fr
Fatima CHARRIER - EL BOUHTOURY	IPREM Mont de Marsan	fatima.charrier@univ-pau.fr
Alaa CHATEAUNEUF	I. Pascal Clermont-Fd	alaa.chateauneuf@univ-bpclermont.fr
Tiphane CHICA-LEFORT	ArScAn Paris	chicalefort.tiphane@gmail.com
Bruno CLAIR	EcoFoG Kourou Guyane	bruno.clair@cnsr.fr
Christian COELHO	PAPC Dijon	christian.coelho@u-bourgogne.fr
Francis COLIN	LERFoB Nancy	francis.colin@nancy.inra.fr
Robert COLLET	LaBoMaP Cluny	Robert.collet@ensam.eu
Thierry CONSTANT	LERFoB Nancy	constant@nancy.inra.fr
Guy COSTA	LCSN Limoges	guy.costa@unilim.fr
Jean Luc COUREAU	I2M/GCE Bordeaux	jean-luc.coureau@u-bordeaux1.fr
Djily DANG	I. Pascal Clermont-Fd	Djily.Dang@etudiant.univ-bpclermont.fr
Olivier DE BUSSAC	Panibois Marcilly en Vilette	olivier.de.bussac@panibois.com
Mélanie DECOURTEIX	PIAF Clermont-Fd	Melanie.decourteix@univ-bpclermont.fr
Louis DENAUD	LaBoMaP Cluny	Louis.denaud@ensam.eu
Wassila DERBAL	BioWooEB / MPE Boumerdes, Algérie	derbalwassila@hotmail.fr
Gérard DEROUBAIX	FCBA Paris	gerard.deroubaix@fcba.fr
Jean-François DESTREBECQ	I. Pascal Clermont-Fd	Jean-Francois.Destrebecq@ifma.fr
Patricia DREVET	PIAF Clermont-Fd	Patricia.drevet@univ-bpclermont.fr
Frédéric DUBOIS	GEMH Egletons	Frederic.dubois@unilim.fr
Emmanuel DUFFOUR	I. Pascal Clermont-Fd	emmanuel.duffour@univ-bpclermont.fr
Serge EKOMY ANGO	IRT Libreville, Gabon	ekomyango@yahoo.fr
Soliman EL KABIR	I. Pascal / GEMH Clermont-Fd	soliman.elkabar@yahoo.fr

**4èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Clermont-Ferrand, 4-6 novembre 2015**

Florent EYMA	ICA Tarbes	florent.eyma@iut-tarbes.fr
Youness FAYDI	LaBoMaP Cluny	Younes.faydi@ensam.eu
Claudiane FLORA	EcoFoG Cayenne, Guyane	claudiane.flora@gmail.com
Eric FOURNELY	I. Pascal Clermont-Fd	eric.fournely@univ-bpclermont.fr
Meriem FOURNIER	LERFoB Nancy	meriem.fournier@agroparistech.fr
Lorenzo FRANZONI	Navier Champs-s-M	Lorenzo.franzoni@enpc.fr
Emmanuel FREDON	LERMaB Epinal	emmanuel.fredon@univ-lorraine.fr
Norbert FRIZOT	PIAF Clermont-Fd	
Philippe GALIMARD	I2M/GCE Bordeaux	Philippe.galimard@u-bordeaux.fr
Philippe GALLET	BioWooEB Montpellier	philippe.gallet@cirad.fr
Patrick GEORGE	- Bagnolet	george.patrick@orange.fr
Jean GERARD	BioWooEB Montpellier	jean.gerard@cirad.fr
Jean-Marc GION	Biogeco Bordeaux	gion@pierroton.inra.fr
Stéphane GIRARDON	LaBoMaP Cluny	Stephane.girardon@ensam.eu
Gael GODI	I. Pascal Clermont-Fd	gael.godi@univ-bpclermont.fr
Xiao Jing GONG	ICA Tarbes	xiaojing.gong@iut-tarbes.fr
Aurélie GOUSSET	PIAF Clermont-Fd	Aurelie.gousset@univ-bpclermont.fr
Joseph GRIL	LMGC Montpellier	joseph.gril@umontpellier.fr
Daniel GUIBAL	BioWooEB Montpellier	daniel.guibal@cirad.fr
Alban GUYOT	BioWooEB Montpellier	Alban.guyot@cirad.fr
Seif Eddine HAMDJ	I. Pascal Clermont-Fd	Seif_Eddine.HAMDJ@univ-bpclermont.fr
Jean-Marc HENIN	LTB Gembloux, BE	jeanmarc.henin@spw.wallonie.be
Roger HERNANDEZ	U. Laval Quebec, Canada	Roger.hernandez@sbf.ulaval.ca
Mohamad HOBALLAH	ESB Nantes	mohamadhussein.hoballah@ecoledubois.fr
Aurélia IMBERT	LERMaB Nancy	aurelia.imberty@univ-lorraine.fr
Frédéric DUBOIS	GEMH Egletons	amine.jamaaoui@etu.unilim.fr
Gérard JANIN	Nancy	gejanin@free.fr
Dominique JAY	Clermont-Fd	
Jean-Louis JULIEN	PIAF Clermont-Fd	j-louis.julien@univ-bpclermont.fr
Haythem KAMOUN	? Nantes	hkamoun@outlook.fr
Zineb KEBBI BENKEDER	LERMaB / LERFoB Nancy	zineb.kebbi-benkeder@nancy.inra.fr
Zineb KHALDI	LCSN Limoges	zineb.khaldi@etu.unilim.fr
QUENTIN KLEINDIENST	LERMaB Nancy	quentin.kleindienst@univ-lorraine.fr
Stéphane LABBE	LERMaB Nancy	Stephane.labbe@univ-lorraine.fr
Mohamed Amine LAHOUAR	Navier Champs-s-M	amine.lahouar@enpc.fr
Anne LAVALETTE	Panibois Marcilly en Villette	anne.lavalette@panibois.com
Robert LE ROY	Navier Champs-s-M	robert.leroy@enpc.fr
Ismaelle LEANDRY	GEMH Egletons	ismaelle.leandry@unilim.fr
Cécile LESIRE	LTB Gembloux, BE	clesire@guest.ulg.ac.be
Clément LHOSTIS	LERMaB Epinal	clement.l-hostis@univ-lorraine.fr
Sylvain LOTTE	BioWooEB Montpellier	sylvain.lotte@cirad.fr
Mathilde LOUERAT	LGPM Châtenay-Malabry	Mathilde.louerat@ecp.fr
Gisèle MAERKY	ArScAn Paris	giselem@gmx.fr
Heba MAKHLOUF	FCBA / MSME Champs-s-M	heba.makhloufhaider@u-pem.fr
Valentin MAKOMRA	I2M/GCE Bordeaux	valentin.makomra@u-bordeaux.fr
Lise MALASSENET	FCBA / LERMaB Bordeaux	Lise.malassenet@fcba.fr
Rémy MARCHAL	BioWooEB Montpellier	remy.marchal@cirad.fr
Corinne MARTIN	LERFoB Nancy	Corinne.martin@agroparistech.fr
Jean-Pierre MATHE	Auvergne Promobois	jpmathe.promobois@orange.fr
Emmanuel MAURIN	LRMH Champs	Emmanuel.maurin@culture.gouv.fr
Jean-Bosco MBAGOU	ENEF / CRMR Québec Libreville, Gabon	Jb_mbagou@yahoo.fr
Pierre Jean MEAUSOONE	LERMaB Epinal	Pierre-jean.meausoone@univ-lorraine.fr
Sébastien MENECHIER	I. Pascal Clermont-Fd	sebastien.menechier@univ-bpclermont.fr
Rémi MEREUZE	ArchAm Nanterre	remi.mereuze@gmail.com

**4èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Clermont-Ferrand, 4-6 novembre 2015**

Juliette MERLE	IPREM / EPCP Mont de Marsan	juliette.merle@univ-pau.fr
Sandrine MEYNIEL	PIAF Clermont-Fd	Sandrine.MEYNIEL@univ-bpclermont.fr
Faiza MNASRI	LERMaB Nancy	faiza.mnasri@univ-lorraine.fr
Cédric MONTERO	LMGC Montpellier	cedric.montero@umontpellier.fr
Jérôme MOREAU	ESB Nantes	franck.michaud@ecoledubois.fr
Bruno MOULIA	PIAF Clermont-Fd	Bruno.moulia@clermont.inra.fr
Rostand MOUTOU PITTI	I. Pascal Clermont-Fd	Rostand.MOUTOU_PITTI@univ-bpclermont.fr
Sung-Lam NGUYEN	I. Pascal Clermont-Fd	Sung-Lam.Nguyen@ifma.fr
Van-Tho NGUYEN	LERFoB Nancy	vantho.nguyen@nancy.inra.fr
Benjamin NIEZ	PIAF Clermont-Fd	benjamin.niez@live.fr
Marc OUDJENE	LERMaB Epinal	marc.oudjene@univ-lorraine.fr
Manon PAIN-BOUTIN	LCSN Trois Rivières, Quebec CA	Manon.Pain-Boutin@uqtr.ca
Claude Feldman PAMBOU NZIENGUI	ENEF Libreville, Gabon	pclaudefeldman@gmail.com
Frederic PERISSE	I. Pascal Clermont-Fd	frederic.perisse@univ-bpclermont.fr
Yves PERRET	Architecte Saint etienne	yperret.archi@wanadoo.fr
Olivier PERRET	Navier Champs-s-M	perreto@lami.enpc.fr
Marianne PERRIN	ICA Tarbes	marianne.perrin@iut-tarbes.fr
Frédéric PERRIN	Région Auvergne Clermont-Fd	f.perrin@cr-auvergne.fr
Floran PIERRE	LGPM Châtenay-Malabry	Floran.pierre@centralesupelec.fr
Luc PIGNOLET	BioWooEB Montpellier	luc.pignolet@cirad.fr
Elie PINTA	ArchAm Nanterre	elie.pinta@club-internet.fr
Idelette PLAZANET	LCSN Limoges	idelette.plazanet@etu.unilim.fr
Régis POMMIER	I2M/GCE Bordeaux	regis.pommier@u-bordeaux.fr
Guillaume POT	LaBoMaP Cluny	Guillaume.pot@ensam.eu
Martial POUZET	I. Pascal Clermont-Fd	Martial.POUZET@univ-bpclermont.fr
François PRIVAT	ESB / FCBA Champs-s-M	Francois.Privat@fcba.fr
Citra PURBA	LERFoB Nancy	citra.purba@nancy.inra.fr
Miora RAMANAKOTO	ICA Tarbes	miora.ramanakoto@iut-tarbes.fr
Jean-Marc RODA	BioWooEB Malaisie	jean-marc.roda@cirad.fr
Jeanne ROIGNANT	PIAF Clermont-Fd	Jeanne.roignant@hotmail.fr
Frédéric ROUGER	FCBA Champs-s-M	frederic.rouger@fcba.fr
Julien RUELLE	LERFoB Nancy	julien.ruelle@nancy.inra.fr
Jean-Bosco SAHA TCHINDA	LERMaB Nancy	saha_jb@yahoo.fr
Wissem SAHMIM	LERMaB Nancy	wissem.sahmim@univ-lorraine.fr
Thouraya SALEM	LERMaB Epinal	thouraya.salem@univ-lorraine.fr
Solafa SALMAN	LERMaB Nancy	solafays@yahoo.com
Nicolas SAUVAT	GEMH Egletons	Nicolas.sauvat@unilim.fr
Kossi SEGLA	BioWooEB / U. Lomé Lomé, Togo	kosisegla@gmail.com
Jialin SONG	LERFoB Nancy	Jialin.song@nancy.inra.fr
Edouard SORIN	ESB Nantes	Edouard.Sorin@etu.ecoledubois.fr
Isabelle THERY-PARISOT	CEPAM Nice	Isabelle.thery@cepam.cnrs.fr
Bernard THIBAUT	LMGC Montpellier	bernard.thibaut@umontpellier.fr
Florian THIEFAINE	Conseil Régional Auvergne	f.thiefaine@cr-auvergne.fr
Evelyne TOUSSAINT	I. Pascal Clermont-Fd	evelyne.toussaint@univ-bpclermont.fr
Marie-Christine TROUY	LERMaB Nancy	marie-christine.trouy@univ-lorraine.fr
Céline VAÏANOPOULOS	LTB Gembloux, BE	celine.vaianopoulos@spw.wallonie.be
Antoine VERNAY	PIAF Clermont-Fd	Antoine.vernay@clermont.inra.fr
Vincent VERNEY	ICCF Clermont-Fd	vincent.verney@univ-bpclermont.fr
Imen YAHYAOUÏ	ICA Tarbes	Imenyahyaoui212@gmail.com
Rachida ZERROUKI	LCSN Limoges	Rachida.zerrouki@unilim.fr
Meng ZHOU	Navier Champs-s-M	meng.zhou720@outlook.com