



**HAL**  
open science

## Actes des 13eme Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

Eric Badel, Joseph Gril, Clément Boudaud, Mathilde Monachon, Franck  
Michaud

► **To cite this version:**

Eric Badel, Joseph Gril, Clément Boudaud, Mathilde Monachon, Franck Michaud. Actes des 13eme Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois. 2024. hal-04818274v1

**HAL Id: hal-04818274**

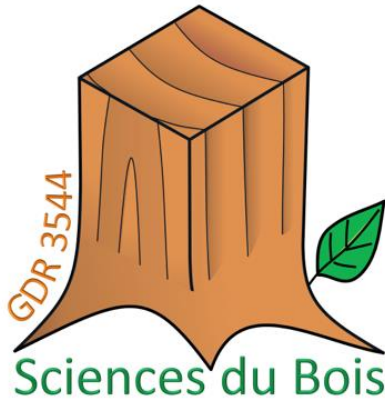
**<https://hal.inrae.fr/hal-04818274v1>**

Preprint submitted on 4 Dec 2024 (v1), last revised 19 Dec 2024 (v2)

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

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

Public Domain



**PROVISOIRES**

13È JOURNÉES SCIENTIFIQUES

**GDR SCIENCES  
DU BOIS**

20 AU 22 NOVEMBRE 2024  
ESB | NANTES



**GDR**

Groupement  
de recherche

**Sciences du bois**

**Actes (provisoires)**

Coordination et édition: Eric Badel (PIAF), Joseph Gril (Institut  
Pascal), Franck Michaud (ESB)

## Table des matières

Éditorial	3
Comités	4
Soutiens et sponsors	5
Programme des Journées	6
Groupes de travail	11
Visites	19
Sessions plénières	21
Posters / présentations flash- Session A	30
Posters / présentations flash- Session B	33
Posters / présentations flash- Session C	36
Liste des participants	371
Liste des participants « entreprises »	380

## Éditorial

Depuis sa première édition en 2012, cet événement est organisé tous les ans dans un nouveau campus, et est une opportunité pour ses participants de découvrir les différents sites nationaux de recherche en sciences du bois. En 2024, Nantes nous accueille en organisant cette 13<sup>ème</sup> édition des Journées Scientifique Annuelles du GDR 3544 Sciences du Bois.

Les sciences du bois sont pratiquées actuellement par une communauté très diverse par ses disciplines, thématiques et contextes institutionnels. Les objectifs du GDR 3544 Sciences du Bois sont de rassembler cette communauté autour de thèmes scientifiques transversaux, de proposer des actions de coordination en matière de pédagogie, de mettre en place des partages de ressources et d'établir des relations avec la communauté scientifique nationale, voire internationale francophone, et les acteurs professionnels.

L'objectif des journées scientifiques du GDR est de partager une culture commune. Cette manifestation s'est tenue les années précédentes à Montpellier (2012), Champs-sur-Marne (2013), Nancy (2014), Clermont-Ferrand (2015), Bordeaux (2016), Nantes (2017), Cluny (2018), Épinal (2019) et Grenoble (2020), Montpellier (2021), Nice (2022), Limoges (2023). A noter que les actes de toutes ces manifestations sont accessibles librement sous HAL. (<https://hal.science/>)

En 2024, cette manifestation a été organisée à Nantes au sein de l'ESB et en particulier par les chercheurs et enseignants-chercheurs du LIMBHA (Laboratoire Innovation Matériaux Bois Habitat), dont les recherches s'orientent autour de deux axes : « l'économie circulaire » et « le confort du cadre bâti ». La participation à ces journées a été un record avec plus de **plus de 240 personnes** dont 18 participants étrangers et une trentaine d'industriels auxquels s'est rajoutée la présence exceptionnelle de 250 étudiants de l'ESB.

Le fil rouge de ces journées était le thème « De l'arbre au panneau, ou la circularité des flux matières bois ». Ces journées ont consisté en des exposés invités, de près de **80 présentations éclair** introduisant autant de **posters**. Des réunions de **14 Groupes de Travail** à l'initiative des participants se sont déroulées ; dont certaines, comme « Panneau de Fibres », innovaient la formule pour la première fois. Des possibilités de découverte des activités des laboratoires du campus hôte et d'entreprises et lieux culturels locaux ont été organisées sur une après-midi, toujours sur le thème du bois, bien sûr ! Deux belles innovations pour cette édition 2024 :

- i) l'organisation d'une session orientée vers les **industriels** dont plus d'une trentaine ont été invités à participer,
- ii) l'organisation de plusieurs **Master Class filmées** par des ténors de notre communauté à destinations des nombreux étudiants venus les écouter. Ces interventions seront rendues disponibles en particulier sur notre site web.

Le GDR 3544 « Sciences du Bois » remercie particulièrement le comité local d'organisation de l'ESB de Nantes qui a œuvré pour la réussite de cet événement, les soutiens financiers institutionnels et privés, ainsi que l'ensemble des membres du comité scientifique qui ont pris le temps de relire les résumés des communications afin de garantir la qualité des textes que vous retrouverez dans ces actes.

Nous vous souhaitons une très excellente et instructive lecture !

Eric BADEL et Franck MICHAUD

# Comités

## Comité d'organisation local

- Clément BOUDAUD (Génie Civil), LIMBHA, ESB, Nantes
- Francesca LANATA (Génie Civil), LIMBHA, ESB,
- Franck MICHAUD (Composites et Matériaux bois), LIMBHA, ESB, Nantes
- Mathilde MONACHON (Chimie), LIMBHA, ESB,
- Romain WEIGEL (Resp. SHS/Gestion de projet), ESB, Nantes

## Comité scientifique

- Tancrède ALMERAS (Biomécanique), LMGC, CNRS, Montpellier
- Olivier ARNOULD (Mécanique), LMGC, Univ. Montpellier, Montpellier
- Eric BADEL (Hydraulique, Biomécanique), PIAF, INRAE, Clermont-Ferrand
- Loïc BRANCHERIAU (Mécanique), BioWooEB, Cirad, Montpellier
- Kévin CANDELIER (Chimie), BioWooEB), Cirad, Montpellier
- Myriam CHAPLAIN (Mécanique), I2M, Univ. Bordeaux, Bordeaux
- Bertrand CHARRIER (Chimie, durabilité, composites), IPREM, Univ. Pau, Pau
- Bruno CLAIR (Biomécanique), LMGC, CNRS, Montpellier
- Thierry CONSTANT (Biomécanique), SILVA, INRAE, Nancy
- Guy COSTA (Physiologie), LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Annabelle DEJARDIN (Biologie), BIOFORA, INRAE, Orléans
- Louis DENAUD (Mécanique, usinage), LaboMap, ENSAM, Cluny
- Jana DLOUHA (Biomécanique), SILVA, INRAE, Nancy
- Frédéric DUBOIS (Mécanique), GC2D, Univ. Limoges, Egletons
- Philippe GERARDIN (Chimie), LERMAB, Univ. Lorraine, Nancy
- Joseph GRIL (Biomécanique), Institut Pascal, CNRS, Clermont Ferrand
- Patrick HEURET (Biologie), AMAP, CIRAD, Montpellier
- Bertrand MARCON (Mécanique), LABOMAP, ENSAM, Cluny
- Emmanuel MAURIN (Culture, Patrimoine), LRMH, Champ sur Marne
- Rostand MOUTOU PITTI (Génie Civil), Institut Pascal, UCA, Clermont Ferrand
- Anélie PETRISSANS (Chimie\_Procédés), LERMAB, Univ. Lorraine, Nancy
- Gilles PILATE (Biologie), BIOFORA, INRAE, Orléans
- Vincent PLACET (Mécanique), FEMTO, Univ. Franche-Comté, Besancon
- Guillaume POT (Mécanique), LABOMAP, ENSAM, Cluny
- Romain REMOND (Transferts thermiques), LERMAB, Univ. Lorraine, Epinal
- Nicolas SAUVAT (Génie Civil), Institut Pascal, UCA, Clermont Ferrand
- Yannick SIEFFERT, (Génie Civil), 3SR, Univ. Grenoble, Grenoble
- Isabelle THERY-PARISOT (Anthracologie), CEPAM, CNRS, Nice
- Marie-France THEVENON (Chimie), BioWooEB, Montpellier
- Bernard THIBAUT (Biomécanique), LMGC, CNRS, Montpellier
- Evelyne TOUSSAINT (Mécanique), Institut Pascal, UCA, Clermont-Ferrand
- Marie-Christine TROUY (Anatomie), LERMAB, Univ. Lorraine, Epinal

## Soutiens et sponsors



Ecole Supérieure du Bois



Agence Universitaire de la Francophonie



Nantes Métropole



AgroParisTech



Ministère de la Culture



INRAE



CNRS



Melinea Innovation



Pôle de Compétitivité Xylofutur

# Programme des Journées

	MERCREDI 20/11		JEUDI 21/11			VENDREDI 22/11	
	Chercheur	Etudiant	Entreprise+Che	Chercheur	Etudiant	Chercheur	Etudiant
08:00	Accueil			GT 2			
08:30	Ouverture journée			GT 2	Masterclass 2	GT 3	
09:00			accueil entreprises				
09:30	Plénière 1	Plénière à distance	Flashtalk 2 (entreprises)			Plénière 3	Plénière à distance
10:00	Plénière plateforme 20'		Session posters 2 (entreprises)				
10:30							
11:00	Flashtalk 1		Plénière entreprises		Masterclass 3 & 4	Bilan GT	Masterclass 4/5
11:30							
12:00	Session poster 1		Ateliers entreprises	La Xylothèque dans l'évolution			se des prix & cl
12:30			Ateliers ESB				
13:00	Repas 13h		Repas 13h			Buffet froid & sandwiches	
13:30							
14:00							
14:30	Plénière 2	Plénière à distance	Visites entreprises		Libre		Travail de restitution
15:00							
15:30	Flashtalk 2						
16:30	Session posters 2						
16:00							
17:00							
17:30	GT 1	Masterclass 1					
18:00							
18:30							
19:00							
19:30							
20:00	Réunion du COFIL		Gala				
20:30							
21:00							



## **Mercredi 20 novembre**

**08h00**      **Accueil**

**08h30**      **Ouverture**

08:30 – Eric BADEL

**09 :30 Session 1 Filière Forêt-Bois (chairman : Christine Deleuze, ONF)**

09:00 – Salomé FOURNIER

09:30 – Fleur LONGUETAUD

**10 :30 – Les plateformes des Sciences du Bois**

11:00 – Flashtalk A

12:00 – Session posters –A et pause Café

13:00-14:30 –Pause Déjeuner

**14 :30 Session 2 Construction Durable (chairman : Pierre Blanchet, Univ. Laval, Quebec)**

14 :30 Bertrand LARATTE

15:00 – Pierre-Antoine CORDY

15:30 – Flashtalks B

16:30 – Session posters –B

**17:30-19H00 – Groupes de Travail Session 1**

- GT FORMATION
- GT PANNEAUX DE FIBRES
- GT XYLOMAT
- GT IMAGERIE
- GT SAVOIRS ARTISANAUX

*17:30-18H30 – Masterclass 1 (programme étudiants)*

**19h00**      Réunion COmité de Pilotage





## Jeudi 21 novembre

### 8:00-9 :30 – Groupes de Travail Session 2

- GT CONTROLE NON DESTRUCTIF
- GT USINAGE
- GT RUPTURE
- GT NIRS
- GT ECOLOGIE DU BOIS

8:30-9H30 – *Masterclass 2 (programme étudiants)*

9:30 – Flash talks C

10:00 – Session posters –C

### 11 :00 Session « Recherche Entreprises » (Chairman : Clément BOUDAUD, ESB)

11 :00-13 :00 : *Masterclass 3 et 4 (programme étudiants)*

11 :00 Xylofutur (Apolline Oswald), Ademe (Macia Vidal), FCBA (Maud Chemin), Gascogne (Laurent Castet)

11:30 –13 :00 : Atelier Recherche / Entreprise

11H30-13H00 : La xylothèque dans l'évolution (Paul Corbineau) suivie des Ateliers ESB

13:00-14:00 –Pause Déjeuner

### 14:00 Visites d'entreprises et sites culturels autour du bois

VISITE 1 : Piveteau

VISITE 2 : Beneteau

VISITE 3 : Atelier Perrault

VISITE 4 : Forêt du Gavre

VISITE 5 : Découverte de Nantes par les arbres

VISITE 6 : Visite de l'île de Nantes autour de la filière bois

VISITE 7 : Ateliers ESB

VISITE 8 : Macoretz

**19h30** Dîner de gala –



**Vendredi 22 novembre**

**8:30-9 :30 – Groupes de Travail Session 3**

- GT XYLOGENESE
- GT PATRIMOINE
- GT CONSTRUCTION
- GT ANALYSE DE CYCLE DE VIE

**9:30 Session 3 Valorisation, fin de vie (chairman : Mark Irle)**

09:30 – Conférences plénières

- Arnaud BESSERER (Lermab)
- Flore LEBRETON (ESB)

10:30 PAUSE CAFÉ

**11:00 Bilan Groupes de Travail**

*11 :00-13 :00 Master class (programme « étudiants »)*

**12:00 Remise des Prix** « Meilleurs Posters »

**12 :45 Clôture** des journées Scientifiques du GDR 3544

**13 :00 Buffet Froid / Sandwichs**

**14 : 00 Fin**

## **Programme des MasterClass**

### **MasterClass 1**

**Mercredi 20 Novembre 17H30**

Joseph GRIL - Bernard THIBAUT

Mécanique - Diversité des comportements Essences de bois - Caractéristiques, Spécificités, Opportunités

### **MasterClass 2**

**Jeudi 21 Novembre 8H30**

Meriem FOURNIER – Tancrede ALMEIRAS

Variabilité - Origine et Observations (de l'arbre aux produits)

### **MasterClass 3**

**Jeudi 21 Novembre 11H00**

JL COUREAU - I. BREMAUD

Sciences du bois et artisanat

REX La recherche au service de la reconstruction de Notre Dame

### **MasterClass 4**

**Vendredi 22 Novembre 11H00**

MF THEVENON – A. BESSERER

Durabilité

# Groupes de travail

**Mercredi 20 Novembre 17H30 -19H00**



**Xylomat**

*Animation :*

Bertrand Charrier, [bertrand.charrier@univ-pau.fr](mailto:bertrand.charrier@univ-pau.fr)

Xylomat est un réseau national dont l'objectif est de développer la dimension environnementale des composites et panneaux à base de bois. Ce réseau est une des six plateformes de l'Equipex Xyloforest ([www.xyloforest.org](http://www.xyloforest.org)) qui s'est structurée de 2011 à 2021. Xylomat s'est développé autour de compétences pluridisciplinaires (chimistes, biologistes, physiciens, mécaniciens, spécialistes d'usinage et de génie des procédés) réparties sur l'ensemble de l'hexagone au sein d'établissements universitaires, écoles d'ingénieurs, entreprises et centres de recherche. Au total ce sont dix partenaires qui composent le réseau : trois universités (Bordeaux, Lorraine et Pau et Pays de l'Adour), 3 écoles d'ingénieur (ESB, ENSTIB et Arts et métiers Paris Tech), un centre technique (FCBA), un centre de recherche (CIRAD) et deux structures de transfert de technologie (CANOE et RESCOLL).

La réunion organisée durant le GDR a pour objectif de faire le point sur les actions menées dans le cadre du réseau et de présenter les projets en cours dont Xylomat 2.

Ordre du jour du GT Xylomat / Mercredi 20 novembre 2024, 17h30

1. Présentation synthétique du réseau Xylomat  
Historique et présentation des activités des membres du réseau.
2. Perspective de développement  
Présentation du projet Xylomat 2 (2022-2024) sur le site Agrolandes (Haut Mauco, près de Mont de Marsan)  
Discussions sur les possibilités de monter des projets de recherche et développement collaboratifs
3. Debat sur la recherche partenariale et la démarche entrepreneuriale

<https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail/Xylomat>



## Formation

### Animation :

Marie-France Thévenon, [marie-france.thevenon@cirad.fr](mailto:marie-france.thevenon@cirad.fr)

Bruno Clair, [bruno.clair@cnrs.fr](mailto:bruno.clair@cnrs.fr)

Dans le cadre du GT Formation, trois (3) étudiants de 1<sup>ère</sup> année du Master Sciences du Bois, Université de Montpellier, présenteront

la préparation de leur "Science Camp" (Les Savanturiers, Ecole de la Recherche) sur le thème de la "diversité Forêt-Bois" , lequel aura lieu à l'Université de Montpellier.

Nous pourrions échanger sur cette initiative, laquelle est partie intégrante de leurs apprentissages (il s'agit ici d'une étude de cas du Masters Sciences du Bois).

Au delà de ceci, nous pourrions nous interroger sur la perception de la filière Forêt-Bois par le "grand public" ainsi que l'appétence pour les Sciences du bois et l'attractivité de ses filières d'apprentissage.



## Produits techniques bois et hybrides hautes performance (panneaux de fibres)

### Animation :

Guillaume Pot, [guillaume.pot@ensam.eu](mailto:guillaume.pot@ensam.eu)

Vincent Placet, [vincent.placet@univ-fcomte.fr](mailto:vincent.placet@univ-fcomte.fr)

Les matériaux traités par ce groupe de travail (GT) sont des composites multicouches intégrant du bois sous diverses formes (sciages, placages, lamelles...) et états (bruts, modifiés, imprégnés...) et d'autres matériaux tels que des composites à renforts continus (constitués de fibres synthétiques ou végétales) ou des matériaux d'âme (mousses, nids d'abeille...). Les principaux secteurs d'application de ces matériaux sont la construction et le transport ainsi que tous les secteurs applicatifs nécessitant des performances mécaniques élevées (rigidité, résistance, tenue au fluage, en fatigue, au choc, durabilité...) et d'autres fonctions avancées (tenue au feu, isolation thermique et/ou acoustique, amortissement vibratoire...). Dans la transition écologique, ces familles de matériaux suscitent un vif intérêt, tant pour la recherche que pour des applications industrielles, au sein de diverses communautés (bois, composites, milieux fibreux...) et secteurs industriels (bâtiment, génie-civil, transports, ameublement, loisirs...).

Les objectifs de ce groupe de travail sont les suivants :

- Recenser les actions et projets en cours à l'échelle nationale sur cette famille de matériaux.
- Identifier les domaines d'expertise et les verrous scientifiques et technologiques des différents acteurs, issus de diverses communautés.
- Evaluer la complémentarité des acteurs et la pertinence de la mise en place d'actions fédératives et structurantes.
- Partager les connaissances : (i) sur les fibres qu'elles proviennent du bois (xylème), ou des différents tissus des plantes annuelles ainsi que leurs moyens de caractérisation et de modélisation, (ii) sur les matériaux stratifiés et sandwichs, leur moyen de production, la modélisation de leur comportement mécanique, les techniques d'optimisation de

stratification, la prise en compte de la variabilité dans les outils de dimensionnement et les démarches éventuelles en cours auprès des instances de normalisation pour l'utilisation de ces matériaux dans ces secteurs industriels.



## Imagerie

### *Animation*

Evelyne Toussaint, [evelyne.toussaint@uca.fr](mailto:evelyne.toussaint@uca.fr)

Guy Costa, [guy.costa@unilim.fr](mailto:guy.costa@unilim.fr)

Les objectifs de ce groupe de travail sont de (i) faire le point sur les techniques d'imagerie appliquées au bois, sur les compétences techniques et analytiques des membres du GT, (ii) organiser des journées d'échanges, (iii) partager des ressources via les réseaux existants, pour favoriser les échanges interdisciplinaires entre les laboratoires partenaires du GDR.

Plus d'informations :

<https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail/Bois-et-Imagerie>



## Savoirs artisanaux

### *Animation*

Iris Brémaud, [iris.bremaud@umontpellier.fr](mailto:iris.bremaud@umontpellier.fr)

Ce groupe de travail est centré sur les travaux et initiatives à l'interface entre recherche académique et artisanats du bois. Lors des journées du GDR, le GT est ouvert à toutes personnes intéressées par les diverses dimensions des artisanats du bois et des bois d'artisanats. Plus spécifiquement, en termes de recherches, nous nous intéressons en priorité à des démarches interdisciplinaires et inter-métiers, notamment celles qui relient des approches de sciences humaines et sociales et études de la biodiversité et/ou des propriétés des bois, et celles menées dans un esprit d'échanges entre « chercheurs-artistes » et « artisans-chercheurs ».

Pour l'édition 2024 des Journées du GDR Bois, cette réunion de GT comportera de courtes présentations interdisciplinaires, un point des manifestations sur le thème des artisanats du bois, et une discussion/débat. Parmi les thèmes (non-exclusifs) de discussions : les apports réciproques (ou similitudes) de la recherche et de la pratique artisanale dans la construction de connaissances ; la réappropriation des métiers, des techniques et des savoirs ; le lien entre diversité des espèces et diversité des usages et pratiques.

<https://gdr-sciences-du-bois.hub.inrae.fr/groupes-de-travail>

## Jeudi 21 Novembre 8H00 -9H30



### Contrôle et Evaluation Non Destructive

*Animation :*

Marianne Perrin, [marianne.perrin@iut-tarbes.fr](mailto:marianne.perrin@iut-tarbes.fr)

Loïc Brancheriau, [loic.brancheriau@cirad.fr](mailto:loic.brancheriau@cirad.fr)

Après 2016, 2017 et 2018, le GT Contrôle et Evaluation Non Destructifs se réunira à nouveau le jeudi 21 novembre de 8h à 9h30. L'objectif du GT est d'avoir une vision large des différentes méthodes de contrôle non destructif appliquées à l'identification d'endommagements, à l'évaluation des propriétés du matériau ou encore au suivi de la santé structurale. La session de travail sera découpée en trois parties. La première partie sera consacrée à la mise à jour des informations du groupe sur le site internet du GDR (10 minutes). La seconde partie fera l'objet de 3 présentations scientifiques (10 minutes de présentation et 10 minutes d'échanges). Enfin, dans un troisième temps, nous évoquerons les projets communs autour du Contrôle Non Destructif qui pourraient être envisagés.

Plus d'informations :

<https://gdr-sciences-du-bois.hub.inrae.fr/groupes-de-travail/controle-et-evaluation-non-destructive>



### Rupture

*Animation*

Rostand Moutou Pitti, [rostand.moutou\\_pitti@uca.fr](mailto:rostand.moutou_pitti@uca.fr)

Myriam Chaplain, [myriam.chaplain@u-bordeaux.fr](mailto:myriam.chaplain@u-bordeaux.fr)

Frédéric Dubois, [frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

L'objectif de ce groupe de travail est de recenser les travaux liés à la rupture du bois couplée aux comportements thermo-hygro-mécaniques afin d'initier des collaborations et les projets recherches communs entre les laboratoires partenaires du GDR. Ce groupe de travail porte également des projets (par exemple action COST sur la Rupture, projets Européens et ANR ...).

Plus d'informations :

<https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail/Rupture-Bois>



### Usinage bois

*Animation :*

Florent Eyma <[florent.eyma@iut-tarbes.fr](mailto:florent.eyma@iut-tarbes.fr)>

Louis Denaud <[Louis.DENAUD@ensam.eu](mailto:Louis.DENAUD@ensam.eu)>

Les objectifs de ce groupe de travail sont de coordonner les efforts de recherche des équipes francophones impliquées dans l'usinage du bois en créant des synergies et des approches

complémentaires sur des verrous scientifiques. Il s'agira également de mutualiser les plateaux techniques et de favoriser la mobilité des doctorants pour leur permettre de profiter des compétences et des moyens des différentes équipes. Enfin, l'objectif de ce GT est également d'organiser des colloques/séminaires, et d'assurer la diffusion des résultats de recherche liés à l'usinage du bois, en permettant notamment aux étudiants de présenter leurs travaux dans un cadre ouvert et de bon niveau scientifique. Le GT GUB 2024 sera l'occasion de présenter les derniers travaux de recherche en matière d'usinage du bois et de ses dérivés sous la forme de présentations scientifiques et d'échanges avec la communauté scientifique des sciences du bois. Un point sur l'association GUB et notamment la participation de ses membres au prochain International Wood Machining Seminar à Florence en Italie sera abordé

Plus d'informations :

<https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail/Usinage-Bois>



**NIRS & Bois**

*Animation :*

Gilles CHAIX, [gilles.chaix@cirad.fr](mailto:gilles.chaix@cirad.fr)

Nassim BELMOKHTAR, [nassim.belmokhtar@inrae.fr](mailto:nassim.belmokhtar@inrae.fr)

L'objectif de ce groupe de travail Nirs&Bois est de réunir les équipes qui utilisent et développent des approches en spectroscopie proche infrarouge dans le domaine du bois. Il aura pour mission de : (1) recenser les activités et les expériences, (2) s'organiser et créer une communauté spécifique, (3) créer des espaces d'échange afin d'identifier les besoins et les verrous de la communauté pour y répondre, et enfin (4) s'organiser pour initier des collaborations et des projets de recherche communs entre les laboratoires partenaires du GDR. Ce groupe de travail se rapprochera d'autres communautés spécialisées comme ChemHouse, HélioSPIR et Nirs INRAE. Il pourra également être à l'initiative et porter des projets de recherche et développement (par exemple projets Européens et ANR...).

Au programme cette année :

- Une présentation du potentiel d'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge dans l'analyse du bois, accompagnée d'une veille bibliographique et technologique.
- Une présentation d'un projet d'étude comparative du potentiel de la spectrométrie proche infrarouge classique et de l'imagerie hyperspectrale pour répondre à des questions scientifiques liées au bois et aux arbres (INRAE Orléans, INRAE Nancy et CIRAD Montpellier).
- Un spectromètre proche infrarouge portable sans fil sera disponible pour réaliser des démonstrations sur différents échantillons de bois.





## Ecologie du Bois

### *Animation :*

Yannick Sieffert <yannick.sieffert@3sr-grenoble.fr>

David Rodrigues-Soares <soares.d@grenoble.archi.fr>

Ivan Mazel <ivan.mazel@grenoble.archi.fr>

Le GT Écologie du bois sera organisé par la présentation de deux chercheurs travaillant dans le domaine de la construction.

Une première intervention sera faite par Géraldine Brun, doctorante au Département de conservation de l'Université de Gothembourg. Elle présentera une méthode d'application des principes d'architecture régénérative sur le cas du bardage bois. "Du nord de la Norvège à la France en passant par la Suède, la tradition du bardage bois a été étudiée dans le but d'inspirer l'architecture régénérative. Les résultats permettent de réévaluer les notions de durabilité du bois et de performance du bardage et d'entrevoir la possibilité d'une production locale."

Puis une deuxième intervention sera faite par David Rodrigues-Soares, Docteur, Architecte, Designer et agent de Grenoble-Alpes Métropole. Il présentera les conclusions de son travail de recherche sur le développement économique soutenable de la filière bois construction. "L'évolution des pratiques et des outils de récolte, de transformation ou de mise en œuvre du bois dans la construction, ont jusqu'à très récemment été en lien directe avec les savoir-faire et les ressources locales. Après des phases de mondialisation, d'industrialisation et de massification, ces liens se perdent peu à peu et à l'heure où les enjeux environnementaux s'imposent à la société, on constate les limites du modèle actuel. Afin de répondre à ces enjeux, des pratiques nouvelles ont été questionnées et les résultats démontrent qu'il est possible de développer des territoires de manière soutenables, tout en valorisant les ressources naturelles, humaines et matérielles locales

## Vendredi 22 Novembre 8H30 -9H30



### Xylogénèse

*Animation :*

Annabelle Dejardin, [annabelle.dejardin@inrae.fr](mailto:annabelle.dejardin@inrae.fr)

Thierry Constant, [thierry.constant@inrae.fr](mailto:thierry.constant@inrae.fr)

Le groupe de travail Xylogénèse est un point de rencontre et d'échanges autour du thème de la xylogénèse. Son objectif est de créer ou de renforcer les liens existants entre les différentes communautés partageant cette question au travers de différentes approches disciplinaires. Le GT a organisé avec succès de premières journées scientifiques en juin 2019 à Paris, Xylo2022 en juillet 2022 à Nancy et Xylo2024 à Orléans.



### Patrimoine

*Animation :*

Delphine Jullien, [delphine.jullien@umontpellier.fr](mailto:delphine.jullien@umontpellier.fr)

Jean-Luc Coureau [jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr](mailto:jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr)

Le GT patrimoine a pour objectif de sensibiliser les participants à la diversité des cas d'étude rencontrés en terme de patrimoine culturel, et d'ouvrir les discussions sur les thèmes abordés. Nous proposons pour cette séance de groupe de travail 6 courtes interventions autour des thématiques suivantes :

Propriétés mécaniques des anciens matériaux biosourcés. Mark Irle, ESB Nantes

Le monument historique de la halle de Villeréal. Sarah Bouhler, Université de Bordeaux.

Conservation de matériel archéologique : bois immergés. Nathalie Boizot, INRAE Val de Loire.

Collage et assemblages : application sur des objets du patrimoine. Jean-Luc Coureau, Université de Bordeaux.

Conservation des panneaux peints du patrimoine. Delphine Jullien, Université de Montpellier.



## Bois de construction

### *Animation*

Nicolas Sauvat <nicolas.sauvat@uca.fr>

Cédric Montero [cedric.montero@umontpellier.fr](mailto:cedric.montero@umontpellier.fr)

L'ordre du jour du GT Construction de cette année est le suivant :

- point sur l'étude d'opportunité de création d'un GIS Construction menée depuis les dernières journées GDR
- présentation des actions et projet en cours à FCBA (Thomas Catterou)
- présentation des actions, projet en cours ou besoin pour IBC (à confirmer)

Plus d'informations :

<https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail/Construction>



## Analyse de Cycle de Vie

### *Animation :*

Anne VENTURA, [anne.ventura@univ-eiffel.fr](mailto:anne.ventura@univ-eiffel.fr)

Mettre la méthode au service de scénarios de transition éclairés et non de réaliser des ACV de produits. Pour cela, la participation de chercheurs de multiples disciplines est importante (foresterie, l'écologie, les modèles de biomasse, la bioéconomie, propriétés des matériaux, conflits d'acteurs, ...). Le groupe est en création, et son contenu doit encore être défini par ses participants, notamment lors des prochaines journées du GDR de Nantes en 2024.

<https://gdr-sciences-du-bois.hub.inrae.fr/groupes-de-travail>

# Visites

## **VISITE 1 : Piveteau – scierie**

PIVETEAUBOIS est fabricant français de solutions bois pour la construction, l'aménagement extérieur et le bois énergie depuis 1948.

Son activité se décline de la sélection du bois en forêts à la transformation, en passant par la conception et la commercialisation de produits en bois.

Une visite proposée concerne le parc à grumes, la scierie et l'atelier de production du CLT

## **VISITE 2 : Beneteau**

Le groupe Beneteau est un groupe d'origine française actif dans l'industrie nautique. Il commercialise des bateaux de plaisance, à voile ou à moteur, monocoques ou catamarans.

Visite des deux principales ébénisteries du groupe BENETEAU.

## **VISITE 3 : Atelier Perrault**

Ateliers Perrault est une entreprise de menuiserie-ébénisterie, de charpente, de ferronnerie et de serrurerie d'art, fondée en 1760 et, aujourd'hui, spécialisée dans la restauration d'édifices patrimoniaux, la réalisation de créations traditionnelles et la reproduction d'ouvrages d'art du XIV<sup>e</sup> siècle au XX<sup>e</sup> siècle.

## **VISITE 4 : Foret du Gavre**

Visite assurée par un expert forestier qui choisira un thème.

## **VISITE 5 : Découverte de Nantes par les arbres**

Visite organisée par Paul Corbineau autour d'un ou deux lieux de Nantes en rapport avec les arbres

## **VISITE 6 : Visite de l'île de Nantes autour de la filière bois**

Visite de l'île de Nantes en commençant par le bâtiment B de Fibois et ensuite un tour permettant de voir les différents bâtiments utilisant du bois et parfois d'autres biosourcés de l'île de Nantes.

## **VISITE 7 : Ateliers ESB**

- Spectroscopie Proche Infrarouge et reconnaissance des essences  
Principes et potentiel de la spectroscopie proche infrarouge pour l'identification des essences de bois.  
Démonstration sur divers échantillons pour montrer l'intérêt de la méthode (rapidité, coût, facilité).  
Animateurs: Tahaina Ramananantoandro & Tiavina Randriambinintsoa (ESSA, Madagascar)
- Bois et acoustique  
Principe et application de l'acoustique pour le matériau bois.

Mise en pratique avec une application instrumentale: le xylophone.

Animateurs: Loïc Brancheriau (CIRAD, Montpellier) & Romain Viala (ITEMM, Le Mans)

- Robotique

Principe et potentiel de la robotique dans les Sciences du bois.

Démonstration d'une méthode d'organisation via programmation d'un robot.

Animatrice: Sana Baklouti (ESB, Nantes)

- Ateliers pratiques Sciences du bois

Etude des propriétés physico-chimiques et mécanique du matériau bois.

Mise en évidence des différences en fonction de l'essence ou de la teneur en humidité.

Animatrice: Mathilde Monachon (ESB, Nantes)

### **VISITE 8 : Macoretz**

Macoretz est une entreprise générale de bâtiment française fondée en 1986 à Saint-Père-en-Retz, en Loire-Atlantique. La société est une Société coopérative et participative. Macoretz est à l'origine un constructeur de maisons individuelles en brique ou en bois en tout corps d'état intégré. Elle réalise également des extensions et surélévations en ossature bois. L'entreprise est aussi agenceur (dressing, cuisine, salle de bain). Enfin, elle s'est diversifiée dans le logement collectif, en briques ou en bois, l'habitat groupé, le logement social, et plus récemment la rénovation énergétique globale

# Programme sessions plénières



## **Plénière 1– Filière forêt-bois (flux et évaluation environnementale). La ressource, état et devenir dans le contexte d'adaptation au changement Climatique ?**

**Chairman : Dr. Christine DELEUZE (ONF)**

Directrice projet Stratégie Carbone de l'ONF depuis 2022.

**Introduction : La forêt française : état et perspectives dans le contexte du changement climatique.**

Intervenantes :

**Ing. Salome FOURNIER (ingénieure de recherche au pôle RDI ONF à Dole)**

**Dr. Fleur LONGUETAUD (Unité SILVA - INRAE à Champenoux)**

*Propos de la session : Enjeux d'adaptation, importance du temps long, augmentation des crises, évolution des disponibilités, équilibre BOBIBE, diversité. Retour sur les sylvicultures des grandes essences et questions posées avec l'adaptation des peuplements, les mélanges d'essences, de structures, les nouvelles essences, quelle qualité pour demain ? Impact de la richesse exceptionnelle de la forêt française, fort diversifiée et riche de ses feuillus (on n'a à peu près que la Roumanie dans le même style en Europe) sur la valorisation matériau : construire des groupes cohérents pour mieux valoriser cette diversité.*

## Session plénière 1

### Filière forêt-bois (flux et évaluation environnementale)

#### La ressource, état et devenir dans le contexte d'adaptation au CC ?



#### **Christine Deleuze (ONF, Maison Alfort)**

Ingénieure Générale des Pont, des Eaux et des Forêts, après plusieurs années en R&D, Christine est depuis 2022 Directrice de projet Stratégie Carbone auprès du Directeur Adjoint de l'ONF. Après une thèse en modélisation forestière, elle a contribué à différents projets de modélisation aux échelles peuplement, forêt et ressource. Elle a piloté un projet ANR sur les évaluations dendrométriques de biomasse et carbone.

#### *La forêt française : état et perspectives dans le contexte du changement climatique*

La forêt française a beaucoup d'atouts pour une société décarbonée en 2050 avec des challenges associés qui sont interrogés dans le contexte du changement climatique : alors que la SNBC2 s'appuyait à 65% sur la forêt et bois pour une neutralité carbone à 2050, le puits forestier s'effondre depuis 10 ans ; alors que la forêt est productrice d'un matériau renouvelable polyvalent qu'est le bois, avec beaucoup d'atouts pour remplacer des matériaux fossiles, la demande en biomasse explose pour remplacer les énergies fossiles, solides mais aussi gaz et biocarburants.

Cette introduction apportera des éléments de contexte sur le croisement des enjeux d'adaptation et d'atténuation pour la forêt française.



**Salomé Fournier (RDI-ONF, Dole)**

Chargée de Recherche et Développement au département Recherche, Innovation et développement de l'ONF à Dole depuis 2020, Salomé a obtenu en 2020 le double diplôme de l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois et de AgroParisTech, ainsi que le Master Agrosociétés, environnement, territoires, paysage, forêt sur le parcours Bois Forêt Développement. Elle est référente sur les bilans carbone des itinéraires sylvicoles, intégrant le bilan des produits bois. Elle a publié un data paper dans les Annales de Sciences Forestières reprenant les valeurs carbone de la plupart des itinéraires sylvicoles de l'ONF.

*Construction de la qualité en forêt et rôle de la sylviculture*

Les forestiers travaillent depuis des siècles pour orienter la croissance des peuplements vers du bois matériau de qualité, c'est tout l'héritage de Colbert et qui explique qu'en près de 200 ans, le volume sur pied moyen des forêts anciennes ait été multiplié par 4.5 . Trouver l'équilibre entre l'arbre dans son individualité et l'écosystème dans lequel il évolue peut sembler relever de l'empirisme, mais loin de l'image d'Epinal, les sciences forestières s'inscrivent dans une longue tradition de rigueur scientifique et de multidisciplinarité , qui ont construit le concept de gestion durable des forêts.

Cet exposé éclairera comment les sylvicultures des grandes essences objectif sont réinterrogées dans le contexte du changement climatique (nouvelles essences, mélanges d'essences et de structures), alors que les nouveaux moyens de transformation permettent d'envisager une évolution des qualités attendues pour les produits de la gestion forestière. Comment transposer nos connaissances en sylviculture pour construire la qualité de demain ?





**Fleur Longuetaud (INRAE, Nancy)**

Chargée de recherche à l'INRAE, Fleur a une formation en mathématiques appliquées et informatique. Après une thèse sur l'analyse d'images par tomographie à rayons X pour l'étude des propriétés des bois ronds, sa thématique de recherche porte sur la caractérisation et la modélisation des propriétés du bois en lien avec les conditions de croissance : densité, variabilité dans l'arbre et entre arbres, sur différentes essences. Des méthodes de caractérisation spécifiques sont maintenant développées pour la traçabilité biométrique des grumes.

*Valorisation de la diversité de la ressource française, comment aborder la qualité des diverses essences et envisager une approche plus générique ?*

Si la France est la troisième forêt d'Europe en surface, c'est la première en termes de ressource feuillue, les autres grands pays forestiers étant principalement résineux. Par ailleurs les essences sont très diversifiées avec une douzaine d'essences majeures, avec en plus l'arrivée de nouvelles essences : soit des essences secondaires plus résilientes, qu'il faudra mieux valoriser, soit des essences introduites. Un enjeu de valorisation sera donc de pouvoir mieux caractériser cette ressource et son potentiel usage matériau.

Cet exposé présentera comment construire des regroupements cohérents de ces essences pour mieux valoriser cette diversité exceptionnelle, et anticiper les débouchés des nouvelles essences.



## Plénière 2 – Vision Internationale de la Construction - Quel est l'avenir du Bois ?

**Chairman : Pr. Pierre BLANCHET (Université Laval, Québec)**

*Titulaire CIRCERB depuis 2013 (Chaire Industrielle de Recherche sur la Construction ÉcoResponsable en Bois) et titulaire de la chaire de recherche du Canada en bâtiments durables. Il est un spécialiste du développement de produit, et a développé un intérêt pour la construction en bois et la construction durable de façon très large, de la conception à l'usage des bâtiments. Le rôle des professionnels, l'impact du choix des matériaux, la performance multicritères des systèmes sont des exemples des thèmes qu'il traite. Il a publié 215 articles avec comité de lecture, détient 2 brevets et a reçu en le prix Synergie pour la collaboration avec les entreprises du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada.*

**Propos introductif, présentation des panélistes, animation de la discussion et intervenant**

Intervenants :

**Pr. Bertrand LARATTE (Université Laval, Québec)**

Après 6 années d'expérience dans le monde du conseil en écoconception, Bertrand Laratte s'est dirigé vers le monde de la recherche afin de mettre à profit ses connaissances industrielles à des fins de recherche. En 2010, il a eu l'opportunité de prendre un poste d'ingénieur de recherche au sein du Centre de Recherches et d'Études Interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) à l'Université de Technologie de Troyes (UTT). Ce poste lui a permis de réaliser une thèse sur la thématique de l'Analyse de Cycle de Vie spatio-temporelle. En 2016, il est devenu enseignant-chercheur à Arts et Métiers Institute of Technology au sein du laboratoire "Institut de mécanique et d'ingénierie". Il continue d'approfondir les modèles de calcul d'ACV intégrant paramètres spatial et temporel, mais aussi de travailler sur de nouveaux modèles de calcul d'impacts environnementaux pour l'ACV. Depuis septembre 2024, il est professeur agrégé en génie environnemental au département des sciences du bois et de la forêt de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval.

**Pierre-Antoine CORDY (Directeur chez NEY & PARTNERS WOW – Timber engineering, Belgique)**

Pierre-Antoine Cordy est ingénieur industriel en construction diplômé de l'ECAM de Bruxelles en 2009. Il commence sa carrière en tant qu'ingénieur de projet au sein de la société Woodlam, spécialisée dans la production, la conception et la pose de structure en bois lamellé-collé. Ensuite, il rejoint le groupe Jonckheere Wood pendant 4 ans durant lesquels il occupe plusieurs fonctions dont la création du bureau d'études interne pour les projets complexes en structure bois. Il intègre le bureau d'études Ney & Partners en 2013 en tant qu'associé pour la création d'une nouvelle entité entièrement dédiée aux études des structures en bois : « Ney & Partners WOW – Bureau d'études bois ». En 2014, il devient cogérant de Ney & Partners WOW. Il travaille sur différents projets et coordonne les nombreuses études d'exécution, dont le Greenbiz, le musée Frans Masereel, l'immeuble Meiboom (R+8), plusieurs écoles, des passerelles en bois. Il étudie actuellement des projets de grande envergure en construction bois ou mixte comme la restauration du bâtiment Pacheco, la restauration de la tour Brunfaut (R+21), le projet Montoyer (R+8), l'école La Brise ou encore la passerelle Tervuren.

**Propos de la session :** *Session construite autour d'une série de questions traitées par les intervenants et animée par le président de séance. Approche prospective basée sur les expertises en présence. Échange final avec l'audience.*



## Plénière 3 – Valorisation en fin de vie – Boucler le flux matière !

**Chairman : Dr. Mark IRLE (ESB /§ FCBA)**

*Directeur de Recherche à l'ESB depuis 2002 et coordinateur de la Recherche au sein du FCBA depuis septembre 2024. Membre fondateur et ancien président d'Innovawood.*

- *Fellow of the Institute of Materials, Minerals and Mining, U.K.*
- *Fellow of the International Academy of Wood Science (IAWS).*
- *Member of the Forest Products Society and Society of Wood Science and Technology.*

### **Propos introductif**

Intervenants :

**Ing. Flore LEBRETON (doctorante ESB, projet Horizon Europe EcoReFibre)**

*Spécialiste de la caractérisation et du recyclage des produits bois en fin de vie*

**Dr. Arnaud BESSERER (Lermab, Univ. Lorraine)**

*Maitre de conférences à l'Université de Lorraine, spécialiste de Matériau et procédés*

## Session plénière 3



**Arnaud BESSERER** (LERMaB Nancy, Maître de Conférences Université de Lorraine)

Arnaud Besserer a soutenu sa thèse de doctorat portant sur les mécanismes d'action des strigolactones sur les champignons endomycorhiziens à arbuscules au sein du Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales de l'Université Paul Sabatier de Toulouse en 2008. Après un post doctorat effectué dans l'industrie sur la même thématique en Allemagne, il poursuit par un second post doctorat en Belgique à Louvain la Neuve portant sur le trafic intracellulaire et les interactions protéiques régulant l'adressage membranaire plasmique et la fonctionnalité des aquaporines de Maïs. Depuis 2012 il est Maître de Conférences à l'Université de Lorraine (ENSTIB-LERMAB). Après avoir étudié les mécanismes de dégradation du bois par les champignons et les bactéries il travaille depuis 2020 sur la valorisation et le recyclage des co-produits et « déchets » bois dans une logique de valorisation cascade du matériau. Les approches combinent l'utilisation de procédés thermo-chimique (explosion à la vapeur) et bioprocédés (hydrolyse enzymatique, fermentation liquide et en milieu solide) afin de pouvoir dépolluer, déconstruire de manière ciblée et fonctionnaliser le bois pour l'utiliser dans différentes applications matériaux.

### **A new COST Action on the Management of Post-consumer Recovered Wood**

BESSERER Arnaud

LERMAB, University of Lorraine, Nancy, France

[arnaud.besserer@univ-lorraine.fr](mailto:arnaud.besserer@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** Post-consumer, recovered wood, environment, strategy, impact

### **Résumé de la communication**

There has already been a COST Action the focused on recovered wood, which was E31-Management of Recovered Wood, that began in November 2002 and ended in May 2007. Much has changed, over the last 17 years, in terms of regulations, the volume of recovered wood collected, awareness of the need to recycle wood and the desire to create new products from recovered wood. As a result, the researchers involved in end-of-life wood product processing believe it is time to bring the various experts together via a new COST Action on recovered wood. A real change of the Circular Post-Consumer Wood for a Sustainable Bioeconomy (9R Wood Circles) COST Action from the previous COST Action is the emphasis on lower-impact environmental strategies, such as Reuse, Repair, Refurbish, Remake, and Repurpose (see Potting et al., 2016, for a description of these environmental strategies).

The COST Action will be designed to address the following challenges:

**Challenge 1:** European R&D community fragmentation – there is the need to develop an effective network of researchers with various expertise. The topic of recycling post-consumer wood is not only a question of wood technology but also of chemistry, economy, social sciences, law etc.

**Challenge 2:** Contamination and Quality – post-consumer wood often contains non-wood components such as glues, paints or coatings, plastic, paper, fabric, metal and stone which hamper the possibility of reusing it and raise environmental and health concerns. Therefore, additional decontamination, cleaning and sorting steps are needed before repurposing or recycling.

**Challenge 3:** Regulation issues – the EU waste regulations are complex and often different countries have different regulations which apply to post-consumer wood and to its possible exploitation routes. Policy recommendations are needed to advise regulations in the support of the circular use of wood.

**Challenge 4:** Technological challenges – the quality of wooden products obtained from post-consumer wood should be better understood in terms of mechanical performance and potential chemical and physical changes caused during first use.

**Challenge 5:** Supply chain issues – across Europe there is substantial variability in the development of supply chains for post-consumer wood, in some regions the lack of infrastructure can cause sub-optimal collection of the available resources.

**Challenge 6:** Economic feasibility of circular processes and business models in the wood sector – there is a need to identify the best paths to build a competitive advantage for circular wood products, considering the perceptions and behaviors of the consumers and industry perspective, to ensure wide dissemination of sustainable solutions.

**Challenge 7:** Standardisation challenges – most of the product and design standards in Europe for timber and laminated wood products are not compatible with re-used wood. It is necessary to adjust those standards and/or develop new standards to accommodate for the special challenges that reused wood presents.

**Challenge 8:** The market acceptability of products made from recovered wood – the quality of recovered wood is often lower than that of fresh wood, e.g. the presence of holes from fixings and discolorations. Are wood products that contain such defects likely to be accepted by the wider market? Is there is a negative reaction to such products, can it be reversed by education?

## Références

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijer, A., 2016. Circular Economy: Measuring innovation in the product chain (Policy Report No. 2544). PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.

## Session plénière 3



**Flore Lebreton** (Doctorante ESB, projet Horizon Europe EcoReFibre)  
Ingénieure bois en troisième année de doctorat à l'ESB

### **Combien de fois peut-on recycler des fibres de bois dans le contexte des panneaux de MDF ?**

LEBRETON Flore<sup>1</sup>, IRLE Mark<sup>1</sup>, BELLONCLE Christophe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Innovation Matériau Bois HAbitat (LIMBHA), École Supérieure du Bois (ESB)  
[flore.lebreton@esb-campus.fr](mailto:flore.lebreton@esb-campus.fr)

**Mots clés :** recyclage du bois ; déchets bois ; MDF ; résistance des fibres ; panneaux de fibres

#### **Résumé**

Les panneaux de fibres sont principalement constitués de fibres de bois vierges, issues d'un procédé de fragmentation du bois. Dans un contexte de raréfaction des ressources naturelles et d'émission de GES par les procédés de transformation, une accélération de la transition de l'industrie des panneaux vers une économie circulaire est indispensable. C'est pourquoi, le projet EcoReFibre dont font partie 10 partenaires industriels, a pour objectif de fabriquer des panneaux de fibres contenant jusqu'à 25% de fibres recyclées et d'évaluer l'impact de la substitution sur les propriétés de panneaux fabriqués sur des lignes de production industrielle (EcoReFibre consortium 2024).

EcoReFibre s'intéresse au recyclage des panneaux en fin de vie. Cependant, qu'en est-il des panneaux ayant déjà traversé un ou plusieurs cycles de recyclage ? Pour répondre à cette question, ma thèse s'intéresse à la recyclabilité de la fibre de bois ou, en d'autres termes pose cette nouvelle question : « une fibre de bois peut-elle être recyclée indéfiniment ? »

S'intéresser aux fibres unitaires permet de mieux comprendre l'impact du recyclage sur le produit fini et anticiper les problématiques futures. Il est ainsi nécessaire de mesurer les propriétés des fibres entre chaque cycle de recyclage pour évaluer leur qualité. Les tests sur les fibres de bois individuelles sont complexes du fait de leur courte longueur. Le défi est de comparer et d'observer l'évolution de la résistance mécanique des fibres durant les cycles de recyclage. La présentation décrira deux méthodes utilisées pour estimer les propriétés mécaniques des fibres de bois recyclées, que sont :

- La séparation et le test mécanique de fibres unitaires qui nécessite la mise en place d'un test de traction adapté
- La réalisation de feuilles de papier fabriquées à base des fibres recyclées et la représentativité de la mesure des propriétés mécaniques par rapport à la résistance des fibres unitaires.

#### **Références**

EcoReFibre consortium. 2024. 'Horizon Europe Project EcoReFibre Website'. Retrieved 19 September 2024 (<https://ecorefibre.eu/>).

## Posters et présentations flashes

<b>SESSION A</b>		<b>Mercredi 20/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
A01	How to measure the volume of a wine barrel ? From stereometry to the invention of the « épaleur », the rumble of the barrel volume measurement	GENTY Clement, VICARD Jean-Charles	LAMPA, HESAM Université
A02	Évaluation de la résistance aux trous du LVL de peuplier	Axel Peignon, Joël Serra, Arthur Cantarel, Eyma Florent, Bruno Castanie	Institut Clément Ader
A03	Evaluation de la propriété gélifiante de la chlorophorine, une biomolécule extraite des coproduits de bois d'Iroko ( <i>Milicia excelsa</i> ) du Gabon	Meyo Degboevi Henri, Mintsas Essono Morel	Ecole Nationale Supérieure de l'Enseignement Technique (GA)
A04	Détermination du métabolisme photosynthétique de <i>Conocarpus lancifolius</i> par analyse du $\delta^{13}C$	BIANZEUBE Tikri, DOUGABKA Dao, GERARD Jean	ANNULE
A05	Analyse probabiliste du comportement élastique de deux essences de bois tropicaux : Influence de la température	Loic Chrislin Nguedjio, Annabelle Mezatio, Frédéric Dubois, Rostand Moutou Pitti, Benoit Blaysat, Pierre Kisito Talla, Nicolas Sauvat, Joseph Gril	I. Pascal
A06	Enhancing wood performance using citric acid and whey ultrafiltration permeate: A promising approach	Keralta Assira, Chaabene Sahar, Winninger Jérémy, Chamberland Julien, Landry Véronique	Université Laval, Quebec
A07	Grasping the craft of cladding facades with wood: alder as a case study	BRUN Geraldine, ALMEVIK Gunnar, JOHANSSON Karin, BJÖRLING Nils	Univ. Gothenburg (D)
A08	Mise au point de formulations biosourcées innovantes à base de polyuréthanes sans isocyanate comme produit de traitement du bois	VINCHELIN Pierre, GERARDIN Philippe, FREDON Emmanuel	Lermab
A09	Modulation des contraintes mécaniques subies par le cambium et conséquences sur la morphogénèse cellulaire	GOURICHON Lucie, BADEL Eric, CLAIR Bruno	PIAF / LMGC
A10	DynaTimberEyes – Développement de jumeaux numériques de bâtiments bois sur la base de mesures par caméras	DION Jean-Luc, CUMUNEL Gwendal, CATTEROU Thomas, LO FEUDO Stefania, HAN Yunhyeok, GOMEZ Dalmer, KORDYLAS Layla	FCBA
A11	Non-destructive measurement of orthotropic elastic properties of wood samples by their modal impulse response	AI FAY Alaa, ARNOULD Olivier, CORN Stéphane, LANGBOUR Patrick, JULLIEN Delphine	LMGC

<b>SESSION A</b>		<b>Mercredi 20/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
A12	Renewable energy evaluation of recycled wood through thermochemical conversion pathway and artificial intelligence optimization: physicochemical, thermodegradation, and flammability behaviours	RIA Aniza, ANELIE Petrissans, MATHIEU Petrissans, WEI-HSIN Chen, CHRISTIAN J. A. Herrera, RAFAEL Quirino	Lermab
A13	Tronçonnage du bois de chêne basé sur la mesure de l'orientation des fibres pour garantir la résistance des aboutages	SOH MBOU Delin, POT Guillaume, VIGUIER Joffrey, MARCON Bertrand, MILHE Louis, CHASTAGNIER Thibault, LOUVET Thibaut, LANVIN Jean-Denis, REULING Didier	Labomap
A14	Bio-inspired wooden hygro-actuators: bilayer structures	ARNOULD Vincent, CHEN Shuoye, MATSUO-UEDA Miyuki, JOSEPH Gril, JAAFARI Chaimaa	I. Pascal
A15	Caractérisation élastique complète d'un petit échantillon de bois par interférométrie laser	LAGARDE Hélène, ROY Philippe, BELLONCLE Christophe, BLANCHARD Philippe	IES
A16	Coefficients of friction between dowel-type fasteners and wood in timber connections	REMOND Valentine, HO Ai Phien, SEIM Werner, MOUTOU PITTI Rostand	I. Pascal
A17	Effet du vieillissement sur la tenue mécanique des joints du bois lamellé-collé	Guilhem Greffier, Luis Espinosa, Marianne Perrin, Eyma Florent	I. C. Ader
A18	Etude de la durabilité hygromécanique de panneaux isolants sous conditions tropicales par techniques de mesure de champs	MAHAMAT SALEH Atteib, DUPRE Jean-Christophe, BOSSU Julie, DOUMALIN Pascal	PPRIME
A19	Influence de la masse volumique sur le comportement avec l'eau de 50 essences de bois tropicaux Africains	Marlain Stevy MIKALA MOUENDOU ; Rodrigue SAFOU TCHIAMA; Stéphane DUMARCA Y ; Philippe GERARDIN	Lermab
A20	Les mycocomposites au service de l'allègement de structure béton : Mycodalle	LANGLOIS Paul, ANTOINE Marie-Laure, PERRIN Christelle, LALLEMAND Julien, BESSERER Arnaud, BROSSE Nicolas	Lermab
A21	MDF wood fibre strength after several recycling cycles	LEBRETON Flore, IRLE Mark, LAGARDE Helene, BELLONCLE Christophe, BUCHNER Julia, LECOURT Michael	LIMBHA
A22	Bois lamellé collés de feuillus de qualité secondaire : Quelles optimisations pour une utilisation en structures ?	PILON Martin, BLERON Laurent	Lermab
A23	Projet Wood2Wood : décontamination et valorisation matériau du bois post-consommateur par couplage de procédés thermochimique et biologique	GIUSTINIANI Coline, ANTOINE Marie-Laure, PERRIN Christelle, LALLEMAND Julien, BESSERER Arnaud, BROSSE Nicolas	Lermab



## Posters et présentations flashs

A24	Couplage ACV/AFM dynamique pour l'ACV de transition : application à la filière forêt-bois française	BOUTIN Alexis, MICHAUD Franck, VENTURA Anne, FRANCOIS Cyrille	Limbha
A25	Un modèle numérique au cœur de la stratégie d'optimisation du séchage du bois alimenté par des énergies intermittentes	STEPHAN Antoine, PERRE Patrick, L'HOSTIS Clement, REMOND Romain	Lermab
A26	Contribution au diagnostic mécanique d'une structure en bois du patrimoine	Bouhleb Sarra, Cointe Alain, Emmanuel Maurin, Histace Aymeric, Mélinge Yannick	I2M
A27	Contribution of oak tree-ring width and stable isotopes to reconstruct hydroclimate variability in central France over the last millennium	HUREAU Charlie, DAUX Valérie, GUILLET Sébastien, BLONDEL François, PIERRE Monique, STIEVENARD Michel, LEBOURGEOIS François, LAVIER Catherine, DUMONT Annie, PERRAULT Christophe, LE DIGOL Yannick, COUTURIER Yann, REGNIER Edouard, GAUTIER Emmanuele	LGP
A28	Effet du vieillissement naturel sur les propriétés physicomécaniques du bois de chêne de la cathédrale Notre Dame de Paris	Matteo Bourchanin, Epiphane Nouemsi Soubgui, Miyuki Matsuo-Ueda, Nicolas Sauvat, Rostand Moutou Pitti, Joseph Gril	I. Pascal
A29	Impact of natural ageing of five Guyanese wood residues on their extractive's chemical composition and anti-termite activity	KIENY Emma <sup>1</sup> , CANDELIER Kévin, Yannick ESTEVEZ Yannick, DUMARCAY Stéphane, GERARDIN Philippe, DAMAY Jérémie, LEHNEBACH Romain, THEVENON Marie-France, Julie BOSSU	Ecofog
A30	Impact de la saignée sur le comportement mécanique des troncs de deux clones d'hévéa	ENGONGA EDZANG Arnould, GRIL Joseph, MOUTOU PITTI Rostand, BADEL Eric	Piaf
A31	Caractérisation de trois enveloppes à hautes performances énergétiques en climat nordique	DUARTE Luigiano, BLANCHET Pierre, COGULET Antoine, RAMADAN Lara	Univ. Laval

<b>SESSION B</b>		<b>Mercredi 20/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Labos</b>
B31	Towards decision support system using heterogeneous knowledge and data for assessing new insulating panels from Guyana material	HAMZAH Hajjar, Franck Michaud, Cédric Baudrit, Christophe Fernandez, Jérôme Moreau	Limbha
B32	La plateforme SILVATECH, infrastructure scientifique collective	RUELLE Julien, ANGELI Nicolas, ROSE Christophe, GERARD Bastien	Silva
B33	Analyse du comportement au feu d'essences de bois gabonais au cône calorimètre et au microcalorimètre de combustion.	Charnelle Steve Mouketou Beumo, Amandine Viretto, Rodolphe Sonnier, Priscilla Linda Omouendze, Marie-France Thévenon, Belkacem Otazaghine	Biowoeb
B34	Caractéristiques anatomiques d'espèces tropicales de différents tempéraments écologiques	NKENE MEZUI Estelle, BRANCHEREAU Loïc, IKOGOU Samuel, MOUTOU PITTI Rostand	I. Pascal
B35	Phénobois : plateforme de phénotypage des propriétés physico-chimiques du bois et hydrauliques des arbres	BOIZOT Nathalie	Biofora
B36	Prise en compte du bois de tension dans un modèle de séchage des placages	KACHOUH Cyril, DENAUD Louis, VIGUIER Joffrey, GIRARDON Stéphane, MARCEL-MATHEY Thibaud	Labomap
B37	Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement hygromécanique transverse contraint des bois dans leur diversité d'applications d'usages.	CHAMBRY Matisse, MONTERO Cédric, ALMERAS Tancrede, JULLIEN Delphine	LMGC
B38	A study of the differences between the 8 mm and 6.3 mm fractions of sieved recovered wood	GALITEKIN Zeynep, IRLE Mark, LEBRETON Flore	Limbha
B39	A study of the relative proportions of wood-based panels found in recovered wood	SOLHAN Edanur, IRLE Mark, LEBRETON Flore	Limbha
B40	CONstruire en BOis avec les forêts de demain (CONBO): Relations entre trajectoires de croissance et comportement mécanique des feuillus secondaires	BAYLE Florian, CLAIR Bruno, LE ROY Robert, HEURET Patrick , MORIN Xavier, SAUVAT Nicolas	I. Pascal
B41	Extractibles volatils des feuilles de sequoia sempervirens français, influence de la position dans la canopée	LATORRE Loïc, Mehats Jeremy, ROBLES Eduardo, CHARRIER Bertrand	IPREM
B42	Introduction Fiber Quality as Measured by Length and Slenderness Ratio of Fibers Adjacent to Small Vessels of Acacia Mangium	RIDWAN Yahya, YANSEN Yansen , SUYAKO Tazuru-Mizuno	Fac. Agri (ID)
B43	A dynamic model for the cyclic behavior of wood assemblies	GOMEZ Dalmer, CUMUNEL Gwendal, BORNERT Michel, PEYRET Nicolas, CATTEROU Thomas	Navier

<b>SESSION B</b>		<b>Mercredi 20/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
B44	Développement et caractérisation de polyuréthanes isolants biosourcés pour le bâtiment durable	Bulingi-Bu-Ngumbe, Dang Mao Nguyen, Mohammed El Ganaoui	Lermab
B45	Valorisation de briquettes de bois obtenues à partir de déchets de bois de plusieurs essences du Gabon : Analyse de Cycle de Vie et bilan énergétique	ITOMBA BAYIKA Joël Eméric, EKOMY ANGO Serge, MANESCAU Brady, MOUTOU PITTI Rostand	EPM
B46	Formulation et caractérisation de résines phénolique biosourcées et fonctionnalisées en vue de la production de revêtement et de matériaux poreux	SENHAJI Youness, CHARRIER - EL BOUHTOURY Fatima	IPREM
B47	Élaboration de nouveaux papiers semi-conducteurs par des procédés de chimie douce pour l'électronique organique.	ABBASSI Hamza, SABER Elhoussaine, VILLANDIER Nicolas, FOURATI Najla, ZERROUKI Chouki, ZERROUKI Rachida	Labcis
B48	Étude phytochimique, caractérisation GC-MS et évaluation de l'activité antioxydante des extraits de <i>Letestua durissima</i> .	Ley-Fleury Ella Nkogo, Stéphane Dumarçay, Edou Engonga Prosper, Gérardin Philippe	Lermab
B49	Projet ClimaLand : observation multidisciplinaire de l'impact de la gestion forestière sur le microclimat forestier dans un contexte de changement du macroclimat – Cas particulier du territoire des Landes de Gascogne	LAVALETTE Anne, DUPLEIX Anna, RUFFIO Emmanuel	Alt-rd
B50	Survie de bactéries multirésistantes (BMR) sur des bois bruts de Douglas et de Pin maritime.	TAISNE Audrey, AVIAT Florence, MINTSA Morel Essono, BELLONCLE Christophe, PAILHORIES Hélène	Limbha
B51	Amélioration de la résolution de cartographie térahertz par méthode de déconvolution	MARC Caroline, MARCON Bertrand, DENAUD Louis, GIRARDON Stéphane, ROUX Benjamin	Labomap
B52	Comparaison des polluants émis par les briquettes combustibles produites à base de la sciure de bois carbonisée à celles du charbon de bois traditionnel	Junior Nganko, Ekoun Koffi Paul Magloire, Prospère Gbaha, Benjamin Kouassi Yao	INP HB
B53	Eco-Friendly Biocomposites: Green Chemistry Approaches for Sustainable Furniture and Thermal Insulation	MOHAMMED Wadah, OSMAN Zeinab, ELARABI Salah, MEHATS Jérémy and CHARRIER Bertrand	IPREM
B54	De l'utilisation de la colophane comme adhésif pour panneaux de particules	LACOSTE Clément, VIRETTO Amandine, RIO Samy	PCH
B55	Impact de la longueur déroulée sur les efforts appliqués par la barre de pression en micro-déroulage	CURIAL Hugo, DENAUD Louis, VIGUIER Joffrey, MARCON Bertrand, VERJAT Fabrice	Labomap

## Posters et présentations flashs

<b>SESSION B</b>		<b>Mercredi 20/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
B56	Influence des algorithmes de traitement de l'effet trachéide sur les propriétés extraites	BOIVIN Juliette, TEYSSIEUX Damien, GIRARDON Stéphane, DENAUD Louis, FROEHL Y Luc, COTTIN Fabrice	Labomap
B57	Master Sciences du Bois à l'Université de Montpellier : Bilan après 4 ans de pédagogie active	Aurélié AUTISSIER, Sandrine BARDET, Bruno CLAIR	Univ. Montpellier
B58	Multiscale modelling of delignified wood's thermal and elastic behaviour	CHIN Yi Hien, GRIL Joseph, VIAL Christophe, MOUTOU PITTI Rostand, OULDBOUKHITINE Salah-Eddine, LABONNE Nicolas, BIWOLE Pascal	I. Pascal
B59	Contribution au comportement en ambiance tropicale de l'evino (Vitex sp) en conditions climatiques contrô	MOUMBINA DINDZAMBOT Lié Régis, IKOGOU Samuel, TALLA Pierre Kisito, MOUTOU PITTI Rostand	Lareva Bois
B60	Modélisation du comportement différé d'éléments en bois massif	OUEIDAT Nour El Hoda, COUREAU Jean-Luc, CHAPLAIN Myriam	I2M

<b>SESSION C</b>		<b>Jeudi 21/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
C61	Capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes pour l'usinage du bois massif	Nasri Linda, Curti Remi, Eyma Florent	IUT Tarbes
C62	Caractérisation expérimentale et modélisation de lamelles aboutées-panneautées de chêne homogénéisées	CORDEIRO Silva, SOH MBOU Delin, POT Guillaume, MARCON Bertrand, VIGUIER Joffrey, MILHE Louis, CHASTAGNIER Thibault, LOUVET Thibaut, LANVIN Jean-Denis, REULING Didier	Labomap
C63	Comparaison des processus de fissuration des bois tropicaux pour la mobilité	HOUNGBEGNON Riccardo, JAILIN Thomas, DOKO Valery, BLAYSAT Benoît, SAUVAT Nicolas, GRIL Joseph, RECHO Naman, XAVIER José, Frédéric DUBOIS, MOUTOU PITTI Rostand	I. Pascal
C64	Quantification de la capacité de dissipation d'énergie des arbres après un feu de forêt : cas du massif de Bitsch (CH)	NOYER Estelle, MONOD Ella, DLOUHA Jana, KRAMER Lukas	HESB
C65	Conception et caractérisations d'un isolant innovant à base de coproduits d'usinage et de champignon : le myco-composite	FIGEL Laura, AYADI Melek, AGUILAR Kyle, SAKER Safwan, ROSE Christophe, PERRIN Christelle, ANTOINE Marie-Laure, LALLEMAND Julien, REMOND Romain, MOUGEL Eric, LE COZ Gaël, HASSAN Alaa, BOUDAUD Hakim, VAHABI Henri, FRECHARD Victor, MEYER Julien, BESANCON Franck, BROSSE Nicolas, BESSERER Arnaud	Lermab
C66	Présentation du projet ForesTIA (improving FORESt and Timber engineering education in Madagascar through Industry-Academia partnerships)	RANDRIAMBININTSOA Tiavina, RAMANANANTOANDRO Tahiana	U. Antananarivo
C67	Projet RESTWOOD : Émergence d'une filière pour le réemploi du bois de structure	REBHI Amal, COUREAU Jean-Luc, GARNESON Thomas, DE HAECK Maxime, GALIMARD Philippe	I2M
C68	Comportement différé des porteurs verticaux aux états limites de service	DUBOIS Frédéric, POP Octavian	GC2D
C69	ReCoWood: Développement d'un démonstrateur automatisé éco-responsable pour le recyclage du bois de construction	BAKLOUTI Sana, BELLONCLE Christophe	Limbha
C70	Valorisation des sciures de MDF pour un composite imprimable en 3D	RAMAUX Johan, NOUVEL Cécile, ZIEGLER-DEVIN Isabelle, BESSERER Arnaud, Benjamin BONNOT, NOYEL Mélanie	Lermab

## Posters et présentations flashs

<b>SESSION C</b>		<b>Jeudi 21/11/2024</b>	
<b>No</b>	<b>Titre</b>	<b>Auteurs*</b>	<b>Labos</b>
C71	Former les charpentiers et les charpentières de bois vert. Quels enjeux, quelles possibilités ?	Brihiez Joseph, LEFEVRE Marc, RAMBAUD Paul	MNHN
C72	Etude de la formulation d'un vernis à bois à base de colophane de Pin maritime (Pinus pinaster)	GOUTY Quentin, CHARRIER Bertrand	IPREM
C73	RECOMPOSE : Valorisation de déchets de bois de menuiseries en matériaux biocomposites pour l'habitat	LE COURBE Arnaud, CARAYON Lionel, CANDELIER Kévin, VIRETTO Amandine	Biowoob
C74	Le Cèdre de l'Atlas, de la graine aux produits finis : ressource et caractérisation du bois	QUERNEC Léane, LANVIN Jean-Denis, REULING Didier, LECOURT Mickaël, PAULMIER Ivan, GABILLE Martine, L'HOSTIS Clément, PIECZAK Lucas, LEGAY Stéphane, MONNARD Sylvain, REYNAUD Céline, RAPHALEN Elisabeth, MAGNE Nicolas, CHERON Nicolas, ELVIRA Mickaël, MEWTON Simon, BAUDRILLER-CACAUD Haimad, LEMAIRE Jean	FIBOIS Sud PACA
C75	Monitoring and modelling of the vibratory behaviour of an 8-storey timber building	Dorian JANOT, Florent VIEUX-CHAMPAGNE, Philippe GUEGUEN, Clément BOUDAUD	Limbha
C76	Construction de mâts en bois : à la croisée du savoir-faire traditionnel et de l'innovation	LEPECQ Yannig, ZAMBALDI Samuel, ARNOULD Olivier	LMGC

## Résumés – Session A

## **How to measure the volume of a wine barrel? From stereometry to the invention of the « épaleur », the rumble of the barrel volume measurement**

GENTY Clément<sup>12</sup>, VICARD Jean-Charles<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tonnellerie Vicard, Groupe Vicard, 184 rue haute de Crouin, F-16100 Cognac

<sup>2</sup>Arts et Métiers Sciences et Technologies, LAMPA, HESAM Université, F-53810 Changé  
[clement.genty@groupe-vicard.com](mailto:clement.genty@groupe-vicard.com) - [clement.genty@ensam.eu](mailto:clement.genty@ensam.eu)

**Key words:** stereometry; barrel volume; metrology; cooperage; waste water

### **Introduction**

The use of barrels has been documented for over two thousand years, with the first known mention dating back to Pliny the Elder in 74 AD (Pliny the Elder 74)

The discovery of wood splitting mastery during the Pleistocene era (Leder, D. et al 2024), a crucial step in creating wood pieces for cooperage (Remy 1991, Genty 2021), may suggest an earlier dating. However, barrels were initially made from plant materials (Mille 2020), making preservation challenging as these materials disappear over time (Leder et al. 2024). Today, the rare vestiges found are mainly reused for well linings Marlière (2001). Therefore, it is difficult to precisely date and locate the history of the barrel.

The barrel became widespread in Europe due to the sanitary and reproducibility issues with glass, persisting until the end of the 19th century. The waterskin alters the organoleptic qualities of the contents. The duo of dolium/amphora disappeared in favor of the wooden container. The cooper can set up anywhere, provided the wood supply is viable. In France, this is a reality, particularly thanks to the sustainability of French forests via the Brunoy ordinance (1346), the first known regulation. Others followed, such as Colbert's ordinance (1669), which the former president of the French coopers' federation boasted in 2014 of still benefiting from Fouillé (2014).

Thus, the continued use of the barrel as a container was guaranteed as long as wood supplies were sufficient and no other invention supplanted it.

### **The Interest of Metrology**

For content estimation purposes, knowing the volume of a barrel is essential to know what and how much to buy.

The first developments of metrological systems date back to before our era with the Egyptian royal cubit, used by the Egyptians from the 18th dynasty by a man named Maya (Monnier 2016). Modern metrology, aimed at unifying France with constant measures, led to the National Assembly voting for the meter on March 30, 1791, following a proposal by the Academy of Sciences, and then the metric system four years later, including the meter, are, stere, liter, gram, and franc.

However, while defining common units of measurement facilitates trade, predicting the volume of a barrel is complicated: only the cooper or merchant can afford to weigh the barrel by filling it with water. The end-user, the client, can only weigh the barrel with its contents, empty it, and then fill it with water to the brim. They will thus have the density of the contents and the capacity of the container. This protocol is tedious.



## Process problem

Knowing the volume of a barrel is essential for understanding the volume of its contents, as the filling level can easily be observed through the bung hole. Thus, an easy-to-use tool was employed by customs officers to quickly and easily measure the barrel to determine the associated tax: the *velte* (Lavaud 2013), also called a *rod* (in French: *verge*) (Portet 2006) or *jauge* (in French: *jauge*) (Mille et al 2019).

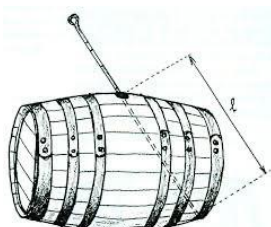


Fig. 1: The velte

In Fig. 1, the velte, a graduated rod, establishes a ratio between the measured diagonal and the total volume of the barrel. However, it is difficult to give a relationship between the diagonal of the velte and the volume of the barrel, as there are many volumetric deformation parameters:

- Number of wooden staves that make up the barrel's shell. This number depends on the quality of the wood upstream;
- Pressure exerted on the hoops by the cooper's driving/mallet or by the hooping machine;
- Humidity and temperature of the storage area.

Nonetheless, mathematicians have been interested in the question, and the first to present his research was Johannes Kepler in 1615 with his reference work *Stereometria doliorum vinarorum*, where he discusses the purchase of wine barrels on the occasion of his second marriage (Kepler 1615, 2018):

*After four days the seller came with a measuring rod. With this one and the same rod he indiscriminately and indifferently explored all wine casks without paying regards to the shape, and without ratiocination or calculation. [...] Hence when I had learnt that here this use of the diagonal rod has been established by public authority, and that the measurers have been sworn to it, it seemed to be not inconvenient for a new husband to explore, according to geometric laws, a new foundation for the mathematical certainty of this abridged measurement, very necessary for the fortune, and to bring to light its fundamentals, if there should be any.*

In addition to Kepler in 1615, there were William Oughtred (1633), Charles Camus (1741), Jean-Philippe Detz (1776), and Jean Taransaud (1976). In 2010, mathematician François Jongmans listed the various geometric incursions into what is now a container for viticultural use and improved the formula, even speaking of *refinement* (Jongmans 2010). Indeed, while the exercise of stereometry is interesting for the theorist, it turns out to be a solitary exercise for the professional, as production disparities legitimize observation rather than prediction. So let's observe.

## Emerging Projects

Observing a volume means waiting for it to be real to estimate its capacity afterwards. Thus, in the case of a barrel, several approaches using physical realities could exist: pressure, via Boyle's law (Boyle 1662) and acoustics via Sabine's law (Sabine 1898).

However, these two solutions are not feasible: due to the deformable nature of wood, it is impossible to keep the barrel in place. This is evidenced by Pascal's barrel-breaking experiment which comes from his observations (Pascal 1698).

### Patented Realizations

A review of the literature shows that recent developments are more concerned with observation than prediction. Two patents, for example, relate to acquisition devices entering through the barrel hole, and use different capture techniques. Let's take a look at these two patents:

*Photogrammetric bung for evaluating the interior volume of a barrel - Patent FR2302608 (Genty 2023)*

This first patent (Fig. 2) concerns a support consisting of three cameras (16a, 16b, and 16c) and a light source (4) mounted on a cylinder oscillating through the action of a handle (9) in a helical manner relative to the bung hole (6) via an appropriate groove (7), i.e., the hole of the barrel. The cameras photographically capture the inside of the barrel, and a third-party photogrammetry software allows for a 3D representation of the whole. Finally, two rangefinders equipped with a temperature probe measure the distance between the two ends, the wooden disks, thus providing a reference value which, thanks to the 3D representation, gives a volume. This patent offers the advantage of quality inspection, which is additional information for the cooper and/or the user.

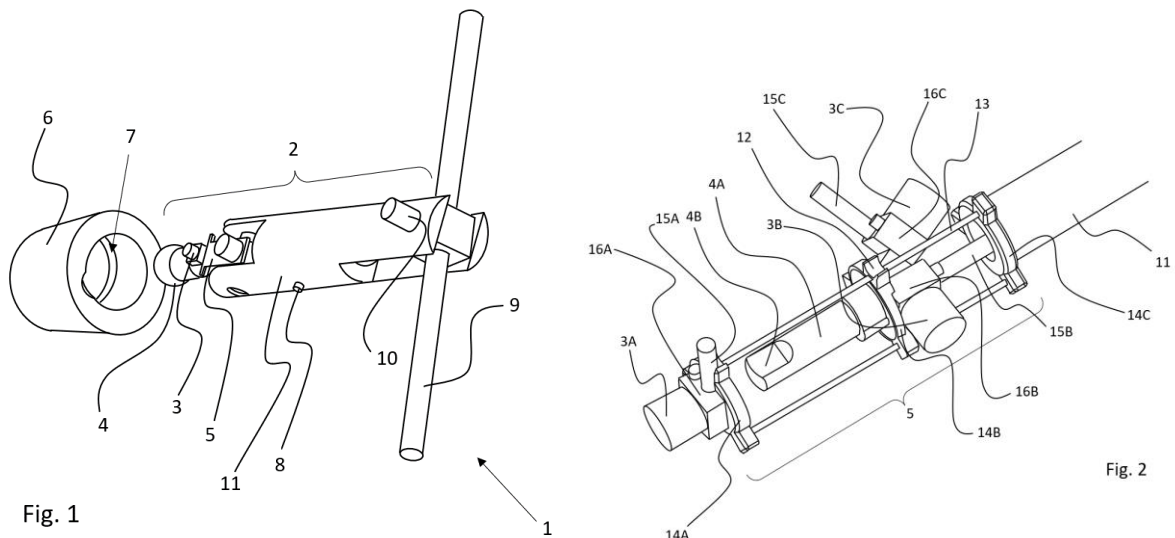


Fig. 2: Views from patent FR2302608

*Épaleur - French patent FR2404313 (Genty et al 2024)*

This second, more recent patent (Fig. 3) is based on a fixed plane, namely the ground, via a system of wheels (30) and an inertial unit. An infrared camera (17), mounted on a 360° orientation arm (5), takes several points through the combined action of gears and motors (11) to virtually and three-dimensionally reconstruct the barrel (35). This method offers the advantage of providing, correlated with a level sensor, a precise volumetric identification of the content level in the barrel, which would have previously undergone volume measurement.

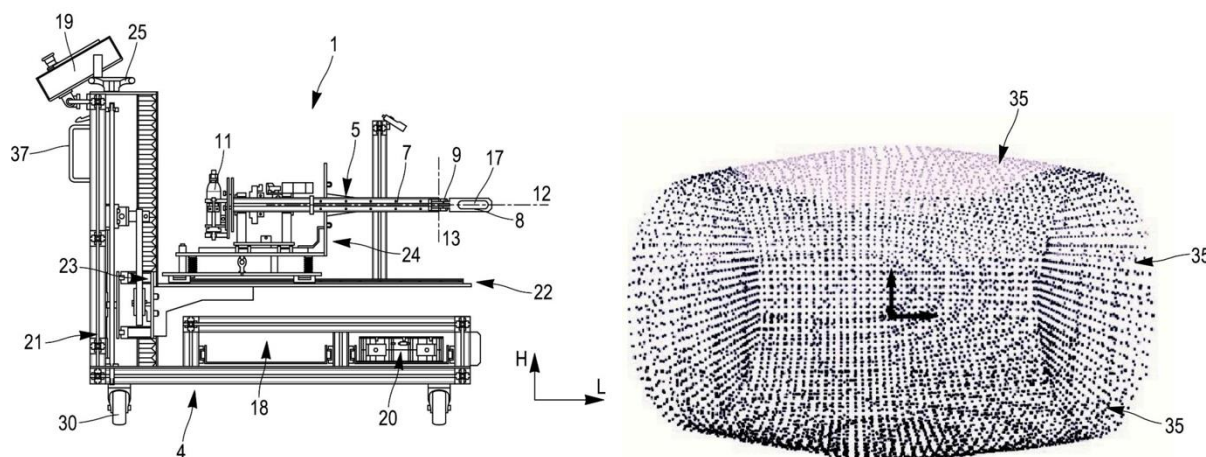


Fig. 3: Views from patent FR2404313

## Conclusion

The volumetric measurement of barrels has been the subject of both theoretical and practical considerations for many centuries. Recent industrial developments suggest an imminent technological breakthrough, maintaining the constant principle: it is better to observe than to predict. The miniaturization of acquisition devices makes it possible to envisage other competing systems.

## References

Boyle R (1662) A defence of the doctrine touching the spring and weight of the air propos'd by Mr. R. Boyle in his new physico-mechanical experiments, against the objections of Franciscus Linus ; wherewith the objector's funicular hypothesis is also examin'd, by the author of those experiments.

Camus C (1741) Sur un instrument propre à jauger les tonneaux et les autres vaisseaux qui servent à contenir les liqueurs. Histoire de l'Académie royale des sciences avec les mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de cette Académie, pp385-402

Detz J-P (1776) Mémoire sur la théorie du jaugeage - Memoires de mathématique et de physique presentés a l'Académie Royale des Sciences, par divers Savans, & lûs dans les Affemblées - Tome Septième.

Fouillé D-M (2014) Le tonnelier fit, ET LE BON VIN FUT dans Rustica 11-17avril, pp 48-49

Genty C (2021) Etat de l'art du sciage courbe en merranderie : méthodes et perspectives. 10es journées du GDR 3544 " Sciences du bois " - Montpellier, 17-19 novembre 2021

Genty C (2023) Brevet français FR2302608 - Bonde photogrammétrique pour l'évaluation d'un volume intérieur de tonneau

Genty C. et al. (2024) Brevet français FR2404313 - Épaleur

Jongmans F (2010) Le jaugeage des tonneaux : un jardin secret en mathématiques pures et appliquées - Quadrature, 75 (Janvier-Mars 2010), p. 23-34.

Kepler J (1615) Nova stereometria doliorum vinariorum

Kepler J (2018) Eberhard Knobloch Nova Stereometria Dolorium Vinariorum/New Solid Geometry of Wine Barrels: Suivi De Accessit Stereometriae Archimedeeae Svpplementvm/a Supplement to the Archimedean Solid Geometry Has Been Added. Les Belles Lettres

Lavaud S (2013) Tours et détours des mesures médiévales du vin de Bordeaux. In Société des historiens médiévistes de l'Enseignement supérieur public (éd.), *Mesure et histoire médiévale* (1-). Éditions de la Sorbonne.

Leder D, Lehmann J, Milks A, Koddenberg T, Sietz M, Vogel M, Böhner U, Terberger T (2024) The wooden artifacts from Schöningen's Spear Horizon and their place in human evolution. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2024 Apr 9;121(15):e2320484121.

Marlière É (2001) Le tonneau en Gaule romaine. In: *Gallia*, tome 58, 2001. pp. 181-201;

Mille P, Deborde G, Dumontet A (2019) Le mobilier domestique en bois médiéval et moderne de la fouille de l'Hôtel du Département à Troyes (Aube), *Revue archéologique de l'Est*, Tome 67 | 2019, 389-423.

Oughtred W (1633) The nevv artificial gauging line or rod together with rules concerning the use thereof: invented and written by William Oughtred. who in all due and respective observance præsenteth the same to the Right Honourable LL. Sir Nicolas Rainton Lord Major of London for this præsent yeare, and Ralfe Freeman Alderman Lord Major elect for the yeare now ensuing. and to the Worshipfull George Ethrege the late Master, and Captaine Iohn Miller the præsent Master of the Company of Vinteners. And to the whole body of that right worshipfull societie., Oxford Text Archive, <http://hdl.handle.net/20.500.12024/A08588>.

Pascal B (1698) *Traitez de l'équilibre des liqueurs, et de la pesanteur de la masse de l'air. Contenant l'explication des caufes de divers effets de la nature qui n'avoient point ehtë bien connus jufques-icy, & particulièrement de ceux que l'on avoit attribuez à l'horreur du Vuide.* Chez Guillaume Desprez, imprimeur.

Pliny the Elder (74) *Natural History* - Book number 14

Sabine W (1898) *Acoustics* - Proceedings of the thirty-second annual convention of the American Institute of Architects, pp32-48

Taransaud J (1976) *Le livre de la tonnellerie.* La Roue à Livres Diffusion

## Évaluation de la résistance aux trous du LVL de peuplier

PEIGNON Axel, SERRA Joël, CANTAREL Arthur, EYMA Florent, CASTANIE Bruno

Institut Clément (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, INSA, ISAE-Supaéro,  
IMT Mines Albi, UPS, Toulouse, France

[peignon@insa-toulouse.fr](mailto:peignon@insa-toulouse.fr)

**Mots clefs :** Bois ; Placages ; Éprouvettes trouées ; Essais de traction ; Point Stress

### Introduction

Si l'on souhaite réaliser des structures durables en bois pour des véhicules (Castanié et al 2024), il peut être nécessaire de les réaliser en plusieurs parties et donc de les assembler en les découpant ou en les perçant, ce qui induit des concentrations de contraintes et diminue leur résistance à la rupture. Cependant, peu d'études s'intéressent précisément au comportement du lamibois (LVL) troué. Bien que plusieurs études traitent de poutres de LVL trouées, ou de structures en LVL trouées, aucune ne s'intéresse à l'effet du trou à l'échelle du coupon de LVL. Concernant le LVL et à notre connaissance, seuls Reiner et al (2023) ont réalisé des essais de traction sur des éprouvettes trouées et ils concluent que des similitudes peuvent être observées entre les endommagements de leurs éprouvettes en LVL et ceux observables sur des composites en fibre de carbone. Contrairement au LVL, ce type d'essais est déjà réalisé sur des composites issus de matériaux synthétiques afin de caractériser des assemblages (Achard et al 2014, Yan et al 1999). Ces essais permettront d'avoir une comparaison directe avec des essais de traction sur des éprouvettes lisses (sans trou) et de comprendre l'influence d'un trou sur le mode de ruine d'un matériau. Ils permettent en outre de déterminer des contraintes admissibles pour le dimensionnement de structures trouées. Généralement, les essais sur éprouvettes trouées servent également de référence pour la modélisation d'autres types de dommages tels que l'impact, la tenue après impact ou la propagation de fissures dans l'étude des matériaux composites (Hallett et al 2009). Par conséquent, l'étude d'éprouvettes trouées est dans le milieu des composites industriels, un cas d'étude largement utilisé qui permet par la suite d'évaluer les modèles de simulation des dommages dans les stratifiés composites.

De plus, la méthodologie du « Point Stress », très largement utilisée en aéronautique pour le dimensionnement de trous dans les matériaux composites en carbone (CFRP) ou en verre (GFRP) sera utilisée et son application au LVL sera évaluée. Cette étude vise donc à caractériser le LVL troué en se basant sur une approche déjà éprouvée sur les composites stratifiés classiques, afin d'étudier son applicabilité sur des stratifiés à base de bois.

### Matériel et méthodes

Des placages de bois de peuplier Koster (*Populus x canadensis*), d'une épaisseur de 1 mm, ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes de traction. Les placages, fournis par le laboratoire LaBoMaP de Cluny, ont été produits à l'aide d'une dérouleuse. La densité moyenne des placages de peuplier était de 377 kg/m<sup>3</sup> (écart-type : 20 kg/m<sup>3</sup>).

Deux stratifications ont été caractérisées :

- [90°/0°/90°/0°]<sub>1/2</sub>s pour la configuration CP (Contreplaqué) ;
- [90°/45°/0°/-45°]<sub>s</sub> pour la configuration QI (Quasi-Isotrope).

Deux configurations, pour chaque stratification, seront étudiées :

- Des éprouvettes lisses (sans trou) ;
- Des éprouvettes trouées en leur centre (Fig. 1b). Le diamètre du trou est de 4,2 mm. Le trou est réalisé par perçage. Ce choix est fait pour garder le rapport de 1/6 entre la largeur de l'éprouvette et le diamètre du trou comme recommandé dans la norme ASTM D5766.

En se basant sur la norme ASTM D3039, les éprouvettes de traction lisses ont une longueur de 250 mm et une largeur de 25 mm. La géométrie des éprouvettes trouées est identique à celle des éprouvettes lisses afin de comparer ces deux configurations. Pour chaque configuration et stratification, 18 éprouvettes de traction sont fabriquées. Sur chaque éprouvette, des talons en aluminium de 1 mm d'épaisseur et de 50 mm de long sont ajoutés à chaque extrémité de sorte à limiter les concentrations de contraintes, et donc la rupture, dans les mors de la machine d'essai (Fig. 1a).

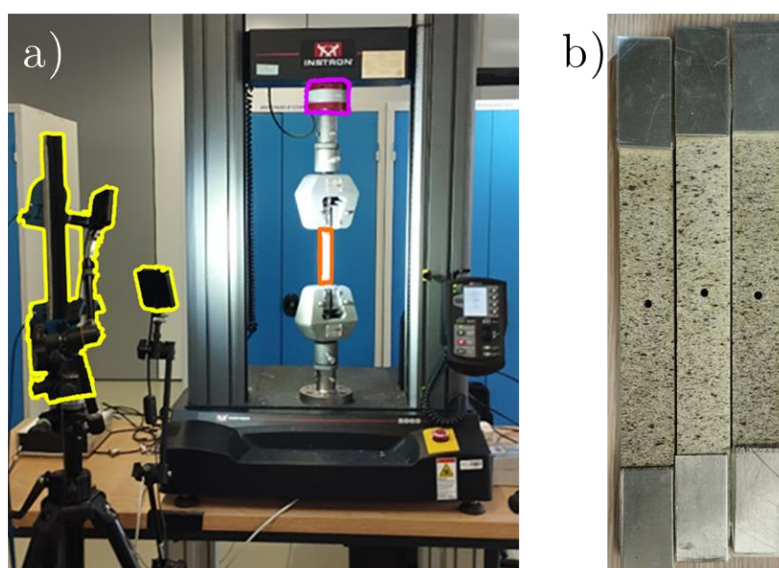


Fig. 1 : Montage expérimental : (a) DIC et éclairage (jaune), cellule d'effort (violet), et éprouvette (orange) ; (b) Eprouvettes de traction QI trouées

Les essais de traction ont été réalisés à température et humidité ambiantes (25,0 °C et 59,5 %HR). Les échantillons de bois ont été caractérisés à un taux d'humidité de 10,6 %. Une machine Instron 5900 a été utilisée pour ces essais. Une cellule de force de 10 kN a été installée, avec une précision de mesure de 0,5 N. La vitesse de déplacement des mors appliquée était de 2 mm/min.

La corrélation d'images numériques stéréo (DIC) a été utilisée pour suivre la déformation de l'échantillon. Deux caméras 8 MP (4096x2160 pixels) ont été utilisées pour acquérir des images des échantillons. Les mouchetis ont été appliqués directement sur les faces des échantillons, les côtés clairs du peuplier contrastant directement avec la peinture noir mat. Les taches ont été réalisées par pulvérisation de la peinture et la taille des motifs a été déterminée en fonction du dispositif expérimental afin d'obtenir une taille minimale de 3 pixels pour chaque tache (Reu, 2014) (Fig. 1b). Les données de corrélation d'images ont été analysées avec VIC Correlated System. Une calibration a été effectuée à l'aide d'une mire.

#### *Point Stress*

En plus de l'étude purement expérimentale, une analyse des concentrations de contrainte en bord de trou sera faite. En effet, lorsque l'on vient solliciter en traction une éprouvette trouée, on observe une concentration de contraintes en bord de trou (Fig. 2) (Lekhnitskii 1969).

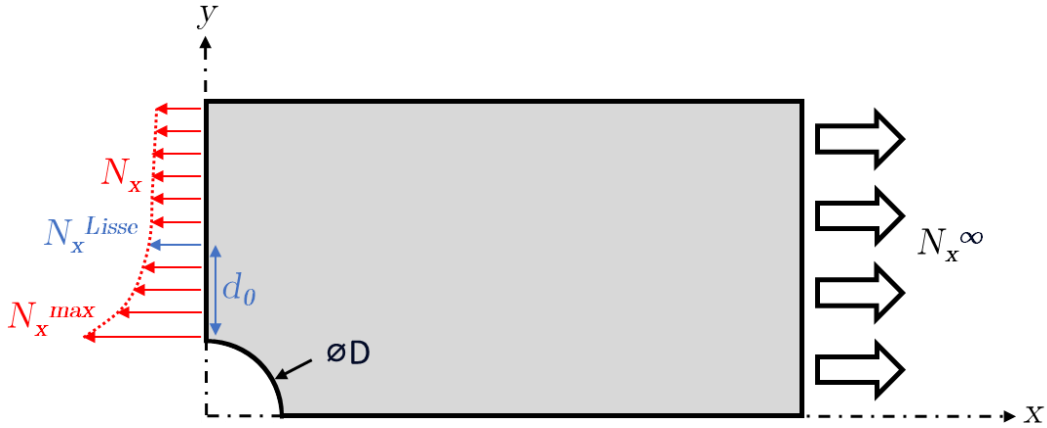


Fig. 2 : Illustration des concentrations de contraintes en bord de trou et des divers paramètres mécaniques

L'un des premiers modèles, largement utilisé dans l'industrie pour rendre compte de ce phénomène, est le critère du « Point Stress » développé par Whitney et Nuismer (1974). Ce critère suppose que la rupture se produit lorsque la contrainte en traction atteint la contrainte à la rupture d'une éprouvette non trouée à une distance caractéristique du trou ( $d_0$ ).

## Résultats

Les courbes contraintes-déformation obtenues lors des essais pour les deux configurations trouées sont illustrées sur les Fig. 3 et 4. Les faciès de ruptures des éprouvettes sont représentés sur les Fig. 5 et 6. On constate une rupture fragile pour les deux stratifications étudiées.

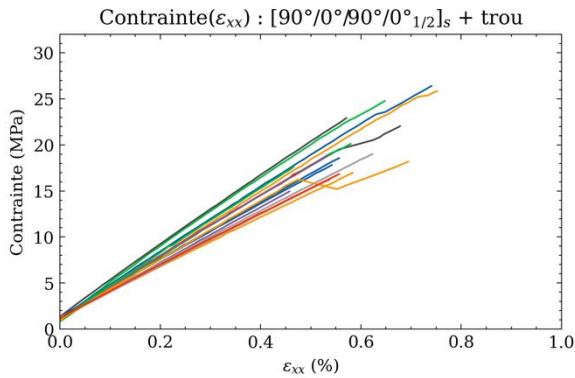


Fig. 3 : Courbes contrainte déformation pour la configuration CP

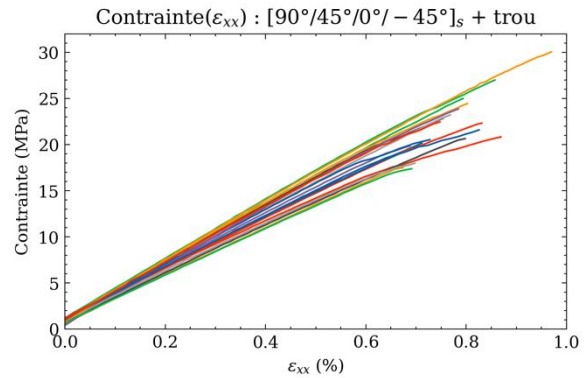


Fig. 4 : Courbes contrainte déformation pour la configuration QI



Fig. 5 : Éprouvettes post mortem d'éprouvettes CP



Fig. 6 : Éprouvettes post mortem d'éprouvettes QI

Afin de caractériser l'effet du trou, il est nécessaire de comparer les contraintes à ruptures des éprouvettes lisses et des éprouvettes trouées. Le Tableau 1 récapitule les valeurs moyennes pour les séries CP et QI.

Tab. 1 : Contraintes à la rupture des éprouvettes CP et QI lisses et trouées  
(l'écart-type est indiqué entre parenthèses)

Série	Contrainte à la rupture – Lisse (MPa)	Contrainte à la rupture – Troué (MPa)	Rapport des contraintes Lisse/Troué (sans unité)
CP	30,3 (4,3)	19,9 (3,3)	1,52
QI	33,1 (4,9)	22,3 (3,2)	1,48

On constate que la réduction de la contrainte à la rupture liée à la présence d'un trou affecte de manière similaire les stratifiés QI que CP car le rapport des contraintes à la rupture entre les éprouvettes lisses et les éprouvettes trouées est quasi-identique (respectivement 1,48 et 1,52). Dans la littérature, les valeurs obtenues sur CFRP, pour une géométrie d'éprouvette équivalente, se trouvent entre 1,3 et 2,2 (Carlsson et al 1989, Russo et Zuccarello 2007).

#### Point stress

Dans ces travaux, la méthode du « Point Stress » sera utilisée en se basant sur un calcul des concentrations de contraintes théoriques pour obtenir une valeur de  $d_0$  pour les deux stratifications étudiées. Il est ainsi possible de tracer, sur la Fig. 7, les concentrations de contraintes ( $N_x/N_x^\infty$ ) en fonction de la distance au trou dans la direction y ( $y-R$ ) ; et d'obtenir une valeur de  $d_0$  pour chaque stratification. Pour la stratification QI, on obtient une valeur de  $d_0$  de 1,43mm. Tandis que, pour la stratification CP, on obtient une valeur de  $d_0$  de 1,14mm. Notons que les valeurs obtenues se trouvent entre 1 et 2 mm, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux classiques obtenus sur des composites pétrosourcés (Bouvet 2018; Russo et Zuccarello 2007).

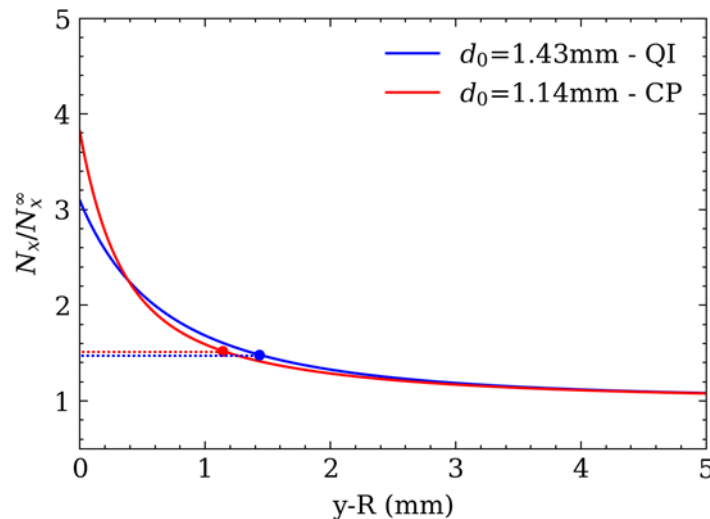


Fig. 7 : Comparaison des concentrations de contraintes en bord de trou pour les stratifications CP et QI trouées

Bien que l'on obtienne des valeurs différentes de  $d_0$  pour nos deux séries, il avait été constaté que les rapports de contraintes à la rupture, entre les éprouvettes lisses et trouées, étaient proches entre les deux séries. Cela s'explique simplement par des concentrations de contraintes en bords de trou qui sont différentes entre les deux séries (Fig. 7). Les concentrations de



contraintes plus importantes en bord de trou pour la série CP s'expliquent par un ratio plus important de plis à 0° dans cette configuration.

## Conclusion

Dans ces travaux, des essais de traction sur des stratifications quasi-isotropiques et contreplaqué sont présentés. Des éprouvettes lisses et trouées ont été caractérisées via des essais de traction unidirectionnels. Concernant la tenue au trou, il semblerait que les deux stratifications étudiées soient impactées de façon similaire, les rapports de contrainte à la rupture entre les éprouvettes lisses et les éprouvettes trouées sont comparables pour les deux stratifications. Dans ce cas, et pour une application structurelle, le choix de l'une ou de l'autre des stratifications ne sera pas fonction de sa tenue au trou. On pourrait donc privilégier la stratification QI qui a la propriété d'être quasi-isotrope, et donc rassurant si la direction de chargement est variable. De plus, la présence de plis à  $\pm 45^\circ$  ajoute de la stabilité dans une stratifié de placage de bois et ce type de pli ajoute une plus-value pour limiter le flambage d'une structure. Toutefois, la stratification CP reste plus facile à fabriquer, et possède l'avantage de limiter les chutes de matières pour sa fabrication.

En plus de caractériser l'effet du trou dans cette étude, une méthode de « Point Stress » est mise en place pour estimer la rupture des stratifiés troués. Cette approche nous permet d'obtenir une valeur de  $d_0$  pour chaque stratification. Il est important de noter que l'approche du « Point Stress » mise en place est identique à celle utilisée pour caractériser des matériaux composites issus de matériaux pétrosourcés. On peut constater que cette méthode semble donc applicable aux stratifiés en bois comme le LVL. Les résultats obtenus sont, de plus, dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus sur des composites industriels, à savoir entre 1 et 2 mm (Bouvet 2018, Russo et Zuccarello 2007).

Cette étude permet de mieux comprendre le comportement mécanique des LVL utilisant des stratifications industrielles. Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider ou affiner le comportement d'un LVL sous des sollicitations plus complexes. En effet, seulement deux stratifications, une seule essence et une seule configuration de trou ont été caractérisées dans cette étude. Caractériser l'effet de la géométrie des éprouvettes ou celle du trou sur les valeurs de  $d_0$  obtenues tout en caractérisant proprement les déformations locales en bord de trou pourraient permettre de mieux comprendre l'effet d'un trou sur le comportement du LVL. De plus, il peut également être intéressant de caractériser l'effet des procédés d'usinage du trou et l'influence d'éventuelles fissurations sur les valeurs de  $d_0$  obtenues.

## Remerciements

La recherche qui a conduit aux résultats présentés ci-dessus a reçu des fonds de l'Agence Nationale de la Recherche française dans le cadre du projet BOOST (ANR-21-CE43-0008-01). Les auteurs remercient le Laboratoire LaBoMaP, Cluny, France pour la mise à disposition des placages de peuplier utilisés dans cette étude.

## Références

Achard V, Bouvet C, Castanié B, Chirol C (2014) Discrete ply modelling of open hole tensile tests. *Composite Structures*, 113:369-381. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.03.031>

Bouvet C (2018) Dimensionnement des structures composites : applications à l'aéronautique. Editions Technip, Paris, 416 p. <https://www.librairielesquare.com/livre/9781784053482-dimensionnement-des-structures-composites-applications-a-l-aeronautique-christophe-bouvet/>

- Castanié B, Peignon A, Marc C, Eyma F, Cantarel A, Serra J, Curti R, Hadiji H, Denaud L, Girardon S, Marcon B (2024) Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review. *Composite Structures*, 329, 117790. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117790>
- Carlsson L, Aronsson C, Bäcklund J (1989) Notch sensitivity of thermoset and thermoplastic laminates loaded in tension. *Journal of Materials Science*, 24(5), 1670-1682. <https://doi.org/10.1007/BF01105690>
- Hallett SR, Green BG, Jiang W-G, Cheung KH, Wisnom MR (2009) The open hole tensile test: A challenge for virtual testing of composites. *International Journal of Fracture*, 158(2):169-181. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9333-8>
- Reiner J, Pizarro SO, Hadi K, Narain D, Zhang P, Jennings M, Subhani M (2023) Damage resistance and open-hole strength of thin veneer laminates: Adopting design and testing principles from fibre-reinforced polymers. *Engineering Failure Analysis*, 143:106880. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106880>
- Reu P (2014) All about Speckles: Aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5):1-3. <https://doi.org/10.1111/ext.12111>
- Russo A, Zuccarello B (2007) An accurate method to predict the stress concentration in composite laminates with a circular hole under tensile loading. *Mechanics of Composite Materials*, 43(4):359-376. <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0033-z>
- Whitney JM, Nuismer RJ (1974) Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials*, 8(3):253-265. <https://doi.org/10.1177/002199837400800303>
- Yan Y, Wen W-D, Chang F-K, Shyprykevich P (1999) Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(10):1215-1229. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00002-0)

## **Evaluation de la propriété gélifiante de la chlorophorine, une biomolécule extraite des coproduits de bois d'Iroko (*Milicia excelsa*) du Gabon.**

MEYO DEGBOEVI Henri<sup>1</sup>, ESSONO MINTSA Morel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Département Génie- Bois, Libreville, Gabon. [henrimoyo@gmail.com](mailto:henrimoyo@gmail.com)

<sup>2</sup>UMRt BioEcoAgro 1158-INRAE, BIOPI, Université de Picardie Jules Verne, Amiens [essonomaurel@gmail.com](mailto:essonomaurel@gmail.com)

**Mots clés :** Gélifiant ; Chlorophorine ; Iroko ; Biomolécules ; Valorisation

### **Contexte et Objectifs**

Les pays du bassin du Congo ont entrepris depuis plusieurs années une profonde mutation de leurs activités industrielles dans le secteur forêt-bois par l'adoption des codes forestiers qui visent la transformation plus poussée de la matière ligneuse sur leurs territoires nationaux (Jeune Afrique 2013). Le Gabon, situé dans cette zone de l'Afrique Centrale, a décidé depuis 2009 l'interdiction de l'exportation des grumes de bois impliquant de transformer localement plus de 75% de la ressource ligneuse. La création de plusieurs unités de transformation de bois sur l'ensemble du territoire a engendré en parallèle la production importante de connexes bois (écorces, chutes de bois, sciures, copeaux...).

Ces résidus de la première transformation du bois sont pour l'essentiel, soit brûlés à perte ou utilisés pour alimenter les séchoirs des entreprises, soit tout simplement abandonnés. Cependant, ces résidus pourraient conduire à différents types de valorisations matières supplémentaires comme cela est déjà pratiqué dans certains pays (ICRIQ 2018). En pleine croissance, la nouvelle filière dite « extractibles » se présente comme une opportunité qui consiste en la valorisation des biomolécules contenues dans la matière lignocellulosique. Celle-ci passe par l'identification des molécules d'intérêt présentes dans les différentes parties du bois (écorce, aubier et duramen) et de leurs gisements potentiels en s'inscrivant dans un contexte d'économie circulaire visant la valorisation des connexes de l'industrie de première transformation du bois. La mise en valeur de ces extractibles permettrait aux acteurs économiques de l'industrie du bois gabonais d'accéder à de nouveaux marchés. La quantité en connexes produits par l'industrie du bois depuis la mesure de l'interdiction d'exportation de grumes non transformées est en nette augmentation, bien que peu de données existent pour quantifier ces volumes et que des études seraient nécessaires pour les évaluer plus précisément. Ces biomolécules peuvent trouver une multitude d'applications dans la formulation de produits pharmaceutiques, cosmétiques, agroalimentaires et nutraceutiques. La demande mondiale pour diverses molécules naturelles bioactives est en forte progression, en partie suite aux nouvelles tendances de consommation et à la recherche d'alternatives aux molécules issues de la pétrochimie faisant appel à l'utilisation de ressources fossiles. Une visibilité accrue des tendances "vertes" dans les médias et la hausse du nombre de circuits de distribution sont également des facteurs de croissance importants pour ces nouveaux marchés. L'intérêt grandissant de la recherche envers les biomolécules issues des produits végétaux représente une voie privilégiée pour se prémunir dans une large mesure de plusieurs maladies (Royer et al 2010).

Ainsi la chlorophorine, biomolécule identifiée dans les extraits de bois de l'iroko a fait l'objet de multiples travaux qui ont permis de mettre en évidence des propriétés intéressantes pouvant

envisager des voies de valorisation de cette dernière. En effet, la chlorophorine a une propriété inhibitrice de la tyrosinase (Shimizu et al 2003a), mais aussi de bonnes propriétés antioxydantes et antifongiques (Huang et al 2009, Onuorah 2000). Nous nous sommes intéressés ici à la propriété gélifiante de la chlorophorine, car cette propriété n'a pas encore fait l'objet d'études dans la littérature, mais aussi du fait que la majorité des études sur les gels sont faites à partir de molécules synthétisées en laboratoire avec très peu de molécules à faible poids moléculaire d'origine naturelle. Sachant que les gels sont des matériaux facilement reconnaissables tout en étant très complexes de part leur structure. Ils sont présents dans de multiples domaines de notre vie quotidienne sous la forme de produits commerciaux tels que le domaine de l'hygiène et de la beauté (gels douche, shampoings, dentifrice, soin pour les cheveux...) le domaine médical ou paramédical (implants, lentilles de contact...) le domaine agroalimentaire (gelée, ...), et dans bien d'autres encore (Firmin 2012). Des travaux ont été effectués sur des organogels afin de trouver des solutions douces pour des appareils optiques sans rayures, ou la récupération de produits pétroliers afin de réduire la pollution en cas de naufrage d'un navire pétrolier (Soundarajan et Mohan Das 2019, Prathap et Sureshan 2012, Chintam Narayana et al 2019). L'objectif de ces travaux a été d'étudier la température de dégelification du gel obtenu à partir de biomolécules extraites du bois d'Iroko, pour mieux le connaître et afin de permettre une meilleure orientation de sa valorisation.

### Matériels et méthodes

Pour réaliser ces travaux ont été utilisés des tubes test de gélification, dans lesquels ont été introduits 5 mg de chlorophorine obtenue par purification grâce à une colonne de silice. Puis sur une balance de précision, divers solvants (benzène, toluène, para-xylène,  $\alpha$ -chlorobenzène, tétralin et bromobenzène, limonène, chloroforme, tétrachlorure de carbone, dichlorométhane, l' $\alpha$ -pinène, cyclohexane, hexane, heptane, l'acétate d'éthyl, du DMSO/Eau et de l'eau) ont été ajoutés dans les tubes jusqu'à 1 g. Les tubes ont été par la suite fermés et chauffés avec un décapeur thermique à 80° C à 85° C, afin de solubiliser l'extrait dans les solvants. L'ensemble est mis au repos à température ambiante du laboratoire jusqu'à la formation des gels.

La température de dégelification ou de fusion, a été mesurée progressivement à l'aide d'un bain marie (37° C) à partir des gels obtenus dans les tubes à différentes concentrations. La température du bain a été augmentée de 2° C toutes les 30 minutes, jusqu'à l'apparition de la destruction du réseau formé par le gélifiant sur la paroi interne du tube, et la température correspondante est relevée.

### Premiers résultats

Les premiers résultats ont montré que la chlorophorine forme des gels avec des solvants aromatiques pétro sources (benzène, toluène, para-xylène,  $\alpha$ -chlorobenzène, tétralin et bromobenzène) et le limonène un solvant vert. Des gels partiels ont été formés avec des solvants chlorés (chloroforme, tétrachlorure de carbone, dichlorométhane) et l' $\alpha$ -pinène. Des précipités dans les solvants aliphatiques (cyclohexane, hexane et heptane) ont été également produits (Tab. 1).

La stabilité thermique a montré une relation entre la concentration du gélifiant et la température de fusion. Afin de décrire la stabilité thermique des gels, nous avons mesuré la température de fusion des gels ou température de dégelification, ou température de transition entre l'état gel et l'état solution à différentes concentrations des gels obtenus avec le toluène et le limonène, car le toluène est le solvant le plus accessible en laboratoire, et le limonène étant un solvant vert pour une valorisation éventuelle. Les résultats sont regroupés dans le Tab. 2 et la Fig 1.

Tab. 1 : Résultats des tests de gélification de 5 mg d'extrait avec des solvants organiques et l'eau après chauffage de 80°C à 85°C et refroidissement

Solvants	Gels opaque	Gel Partiel	Précipité	Soluble
Benzène	+++			
Toluène	+++			
Para-Xylene	+++			
Alpha-Chlorobenzène	+++			
Limonène	+++			
Trétralin	+++			
Bromobenzène	+++			
Eau			+++	
DMSO/Eau(5/1)				+++
DMSO/Eau(1/5)			+++	
Acétone				+++
Chloroforme		+++		
Tétrachlorure de Carbone		+++		
Alpha-pinène		+++		
Dichlorométhane		+++		
Cyclohexanol				+++
Glycérol				+++
Acétate d'éthyle			+++	
Ether Diethyle				+++
Cyclohexane			+++	
Hexane			+++	
Heptane			+++	

Tab. 2 : Test de concentration minimum de gélification

Solvants	0,5 %	1%	2%	3%	4%	5%
Toluène	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Limonène			+++	+++	+++	+++

### Conclusion et perspectives

Il ressort au terme de ces premiers résultats qu'il est possible d'extraire des métabolites secondaires des arbres possédant des propriétés intéressantes. Ceci, à partir des connexes à

l'exemple de l'Iroko (*Milicia Excelsa*) du Gabon, mais aussi qu'il est possible d'obtenir des gels à partir de ces derniers .

Ainsi, il est possible de penser une voie de valorisation des extractibles des connexes de la transformation du bois pour développer la filière des biomolécules dans l'industrie du bois du Gabon.

La suite de ces travaux est de faire l'étude au microscope électronique à balayage (MEB) de la structure des gels de *Milicia Excelsa*, aussi que l'étude de diverses propriétés (anti-inflammatoire, anti-cancéreux, anti-douleur etc) afin d'optimiser la valorisation de cette biomolécule.

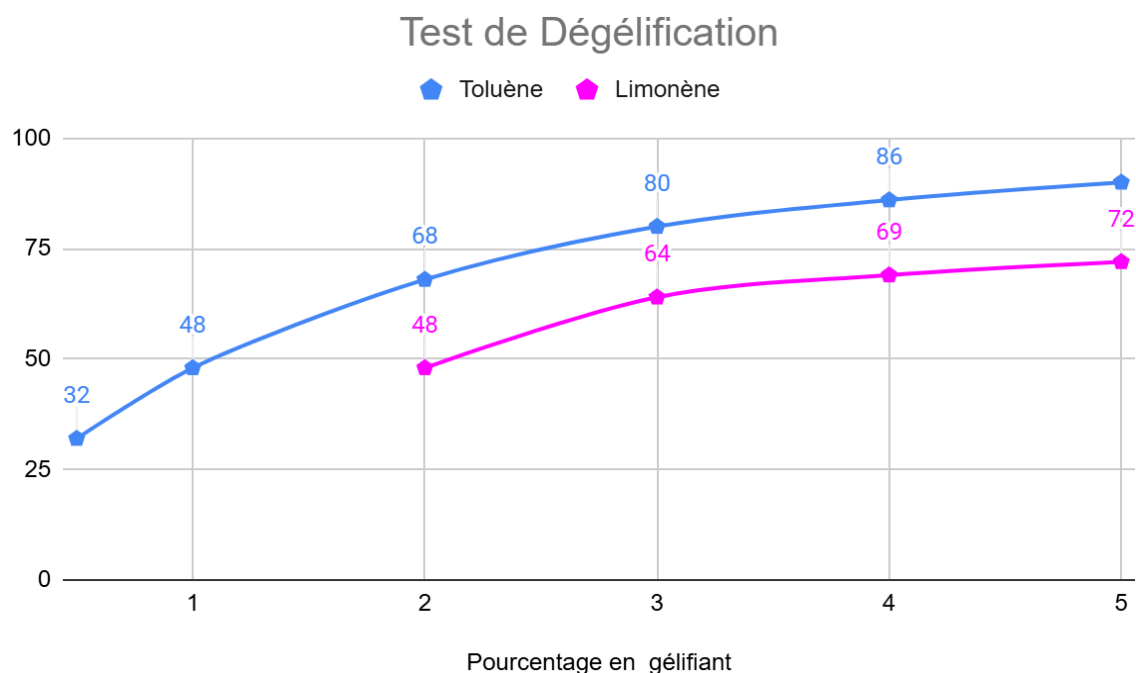


Fig. 1 : Effet de la concentration de la chlorophorine sur la stabilité thermique des gels

## Remerciements

L'état Gabonais via l'Agence Gabonaise des Bourses du Gabon.

## Référence Bibliographiques

Huang Z, Hashida K, Makino R, Kawamura F, Shimizu K, Kondo R, Ohara S (2009) Evaluation of Biological Activities of Extracts from 22 African Tropical Wood Species. *Journal of Wood Science* 55 (3): 225-29. <https://doi.org/10.1007/s10086-008-1024-y>.

Jeune Afrique (2013) Bassin du Congo: la transformation du bois face à de lourds défis.

Prathap A, Sureshan KM (2012); A mannitol based phase selective supergelator offers a simple, viable and greener method to combat marine oil spills; *Chemical communications*. Issue 43, 2012.

Royer M, Houde R, Stévanovic T (2010) Volet 1 : les extractibles forestiers québécois. Potentiel de développement lié aux extractibles forestiers : Etat des connaissances et revue des marchés. Centre de recherche sur le bois. Université de Laval.

Shimizu K, Yasutake S, Kondo R (2003) A New Stilbene with Tyrosinase Inhibitory Activity from *Chlorophora Excelsa*, *ChemInform* 34 (34) <https://doi.org/10.1002/chin.200334209>.

Soundarajan K, Mohan Das T (2019) Sugar-benzohydrazide based phase selective gelators for marine oil spill recovery and removal of dye from polluted water. Carbohydrate Research 481 (2019) 60–66.

St-Laurent Samuel A, Deshaies ME, Richard G, Escafit, E (2017) Guide pratique de mise en valeur du bois post-consommation. Réalisé dans le cadre du projet Faire flèche de tout bois. Québec, Nature Québec, 90 p.

## Détermination du métabolisme photosynthétique de *Conocarpus lancifolius* par analyse du $\delta^{13}\text{C}$

BIANZEUBE Tikri<sup>1</sup>, [DOUGABKA Dao](mailto:dougabkado@yahoo.fr)<sup>2</sup>, GERARD Jean<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'étude et de recherche en technologie industrielle de la faculté des sciences appliquées, Université de N'Djamena, Tchad

<sup>2</sup> Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, BP 60 N'Djamena, Tchad

<sup>3</sup> CIRAD, UPR BioWooEB, 34398 Montpellier, France

[dougabkado@yahoo.fr](mailto:dougabkado@yahoo.fr)

### POSTER ANNULE

**Mots clefs :** Bois ;  $\delta^{13}\text{C}$  ; *Conocarpus lancifolius*

#### Contexte et objectifs

*Conocarpus lancifolius* est un arbre ornemental originaire des régions côtières d'Afrique de l'Est et de la péninsule arabique. Il a été largement introduit dans des pays arides comme le Tchad, au cours des deux dernières décennies. Initialement planté à des fins décoratives, cet arbre a vu son utilisation s'étendre rapidement en raison de sa croissance rapide, de ses faibles besoins en eau et de sa résistance à la sécheresse. De ce fait, il s'avère être une espèce idéale pour dans le cadre de programmes de reboisement et de lutte contre la désertification (Redha et al 2012). Toutefois, malgré l'adoption croissante de *Conocarpus lancifolius* dans ces régions arides, les mécanismes physiologiques qui sont à l'origine de sa tolérance à ces environnements hostiles sont encore peu étudiés, notamment en ce qui concerne son métabolisme photosynthétique.

Le métabolisme photosynthétique des plantes se divise en deux catégories principales : les plantes de type C3 et les plantes de type C4. Les plantes de type C3, constituent la majorité des espèces végétales, et utilisent une voie photosynthétique dite "classique". En revanche, les plantes de type C4 sont quant à elles mieux adaptées aux environnements arides, grâce à une utilisation plus optimale du dioxyde de carbone et de l'eau. Ces deux catégories de plantes présentent des signatures isotopiques distinctes : les plantes de type C3 se caractérisent par des valeurs de rapport isotopique entre le 12C et le 13C ( $\delta^{13}\text{C}$ ) comprises entre -22 ‰ et -30 ‰, tandis que ce même rapport est compris -10 ‰ à -16 ‰ pour les plantes de type C4 (Farquhar et al 1989, Ehleringer 1993).

Au Tchad, pendant la période des fortes chaleurs (de mars à mai), contrairement aux plantes qui voient leurs feuilles se faner et se dessécher, *Conocarpus lancifolius* semble ne présenter aucun signe de souffrance ou de faiblesse. Cette observation amène à se questionner quant à son métabolisme photosynthétique lui permettant de résister face à un tel stress hydrique.

L'objectif de cette étude est de déterminer, à l'aide d'analyse en  $\delta^{13}\text{C}$ , si *Conocarpus lancifolius* est une espèce qui adopte un métabolisme de type C3 ou C4. Cette méthode constitue un outil fiable pour distinguer ces deux types de métabolisme, en raison des différences de fractionnement isotopique dans les voies métaboliques relatives à la photosynthèse.

Les résultats attendus permettront, non seulement de mieux comprendre la capacité d'adaptation de cette espèce au stress hydrique, mais aussi d'évaluer son potentiel pour une utilisation optimale dans les programmes de restauration écologique et/ou de reboisement dans des régions qui deviennent de plus en plus arides.



## Matériel et méthode

### Matériel végétal

Cette étude a été réalisée sur des rondelles de 20 cm d'épaisseur, prélevées à une hauteur de 50 cm au-dessus du sol, sur 5 arbres de *Conocarpus lancifolius* abattus, localisés à N'Djamena, au Tchad. Des échantillons de poudre de bois ont ensuite été obtenus par ponçage effectué (à l'aide d'une râpe métallique) sur des barrettes radiales de 2 cm de large et d'épaisseur 5 mm prélevées dans ces rondelles (Fig. 1).

Les poudres ainsi récupérées ont été stockées dans des tubes en plastique étiquetés avec le numéro de l'échantillon (Fig. 2). Chaque échantillon a ensuite été pesé à l'aide d'une balance de marque Mettler Toledo de précision 0,01 mg, dans des capsules en étain de 5 x 3,5 mm (Fig. 3). Pour la détermination rapport isotopique entre le  $^{12}\text{C}$  et le  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ), 5 microgrammes de poudre de bois, par échantillon, ont été analysés. Cinq échantillons, chacun prélevé sur un arbre différent, ont été analysés dans le cadre de cette étude.



Fig.1 : Ponçage des bois



Fig. 2 : Poudre récupérée



Fig. 3 : Micro pesée

### Méthode d'analyse

Les analyses isotopiques ont été réalisées par spectrométrie de masse des rapports isotopiques (IRMS), en mode dit « flux continu », couplée à un système automatisé de préparation des échantillons. Les échantillons solides ont été analysés à l'aide du système Pyrocube, configuré en mode combustion NCS, conformément à la méthode décrite par Fourel et al (2014).

Les échantillons ont été analysés en une seule gamme, afin d'assurer la cohérence des résultats entre les différents échantillons. Pour vérifier une éventuelle dérive instrumentale au cours du processus d'analyse, des aliquotes du standard ASP 3 ont été placées au début et à la fin du lot. Chaque échantillon a été analysé en trois aliquotes pour garantir la reproductibilité des résultats.

Les analyses ont été réalisées au Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA-UMR5023).

## Résultats et discussions

### Présentation du résultat

L'analyse isotopique du carbone 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) réalisée sur cinq échantillons de bois de *Conocarpus lancifolius* a donné une valeur moyenne de  $-26,4 \pm 0,2$  ‰. Cette valeur se situe dans la plage caractéristique des plantes à métabolisme photosynthétique de type C3, dont les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  varient généralement entre -22 ‰ et -30 ‰ (Ehleringer 1993). Cela suggère que *Conocarpus lancifolius* utilise un métabolisme de type C3 pour la photosynthèse, bien qu'il prospère dans des environnements arides où les plantes C4 sont le plus souvent mieux adaptées.

## Discussion

La valeur moyenne du rapport isotopique  $\delta^{13}\text{C}$  pour *Conocarpus lancifolius*, égale à  $-26,4\text{‰}$ , indique que cette plante adopte un métabolisme de type C3. Ce résultat est en opposition avec les hypothèses initiales, qui, en raison du comportement de l'arbre durant les périodes de fortes chaleurs, suggéraient un possible métabolisme de type C4. Cette divergence soulève des questions sur les mécanismes qui permettent à *Conocarpus lancifolius* de prospérer dans des conditions de stress hydrique extrême. Quels processus physiologiques spécifiques permettent à cet arbre de s'adapter aux environnements arides ?

Des études antérieures ont mis en avant des résultats similaires pour d'autres espèces d'arbres des régions arides, bien que celles-ci ne présentent pas la même tolérance aux températures élevées que *Conocarpus lancifolius*. Par exemple, Gebrekirstos et al (2011) ont obtenu les valeurs moyennes de  $\delta^{13}\text{C}$  suivantes pour quatre essences agroforestières d'Éthiopie : *Acacia senegal* ( $-24,76\text{‰} \pm 0,08$ ), *A. seyal* ( $-24,62\text{‰} \pm 0,34$ ), *A. tortilis* ( $-24,31\text{‰} \pm 0,25$ ), et *Balanites aegyptiaca* ( $-24,48\text{‰} \pm 0,38$ ). Ces espèces, bien qu'évoluant dans des environnements arides, affichent, elles aussi, des valeurs isotopiques caractéristiques des plantes C3.

Plus récemment, les travaux de Condé et al (2020) ont permis de déterminer les valeurs moyennes de  $\delta^{13}\text{C}$  pour *Tectona grandis* ( $-26,9\text{‰} \pm 0,2$ ), *Tamarindus indica* ( $-30,2\text{‰} \pm 0,7$ ), et *Pericopsis laxiflora* ( $-28,3\text{‰} \pm 0,5$ ) en Guinée, confirmant que plusieurs espèces d'arbres en régions sèches adoptent également un métabolisme de type C3. Au Tchad, Dougabka et al (2023) ont obtenu une valeur moyenne de  $-27,5\text{‰}$  pour de  $\delta^{13}\text{C}$  de *Balanites aegyptiaca* dans les zones sahéliennes et soudaniennes, tandis que Fall et al. (1998) mentionnent des valeurs comprises entre  $-24,94\text{‰}$  et  $-28,06\text{‰}$  pour *Faidherbia albida* au Sénégal.

Ces comparaisons mettent en évidence que, bien que les plantes C4 soient souvent mieux adaptées aux environnements arides, certaines plantes C3 présentent des adaptations physiologiques leur permettant de supporter également des conditions de stress hydrique. Le fait que *Conocarpus lancifolius* soit une plante de type C3, tout en montrant une résistance aux températures extrêmes et à la sécheresse, ouvre de nouvelles pistes de recherche. Des travaux plus approfondis focalisé sur ses mécanismes physiologiques spécifiques, tels que le développement de racines profondes ou une meilleure gestion de l'eau, pourrait permettre d'améliorer la compréhension de son mécanisme d'adaptation aux environnements arides.

## Conclusion

Cette étude a révélé que *Conocarpus lancifolius* adopte un métabolisme de type C3, avec une valeur moyenne de  $\delta^{13}\text{C}$  égale à  $-26,4\text{‰} \pm 0,2$ . Malgré ce métabolisme, typique des plantes moins adaptées aux environnements arides, cet arbre présente une capacité remarquable à survivre dans des régions très sèches, probablement grâce à des adaptations physiologiques spécifiques. Ces premiers résultats offrent des perspectives intéressantes pour l'intégration de *Conocarpus lancifolius* dans des programmes de reboisement et de lutte contre la désertification. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour permettre de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à cette tolérance à la sécheresse, afin d'optimiser son utilisation dans des régions encore plus arides.

## Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements à l'Ambassade de France au Tchad pour l'octroi de la bourse ayant permis se soutenir financièrement le séjour scientifique de haut niveau qui a rendu ce travail possible. Nous exprimons également notre profonde gratitude à Jean Gérard

pour la prise en charge des frais d'analyses, ainsi qu'à François Fourel pour la réalisation des expériences et son implication dans ce projet.

### Références

- Condé S, Otto T, Moussa I, Lambs L, Corenblit D (2020) Analyses exploratoires dendrochronologique et dendro-isotopique des ripisylves de la rivière Milo (Guinée). *Physio-géo, géographie physique et environnement*, 15 : 211-231.
- Dougabka D, Bianzeube T, Amadji TA, Gérard J, Djonglibet WD, Bentaleb (2023) Comparative study of the stable carbon isotope ratio of cellulose, lignin and whole wood powder of *Balanites aegyptiaca*. *Holzforschung*, 77(11-12): 855-859.
- Ehleringer JR (1993) Carbon and water relations in desert plants: an isotopic perspective, stable isotopes and plant carbon-water relations? Academic Press : 155-172,
- Fall M, Trimborn P, Ferhi A (1998) Le  $\delta^{13}\text{C}$  dans le bois des végétaux, un indicateur pluviométrique pour le Sahel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(6) : 407-412.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 40(1): 503-537.
- Fourel F, Martineau F, Seris M, Lécuyer C (2014) Simultaneous N, C, S stable isotope analyses using a new purge and trap elemental analyzer and an isotope ratio mass spectrometer. *Rapid communications in mass spectrometry*, 28(23): 2587-2594.
- Gebrekirstos A, Van Noordwijk M, Neufeldt H, Mitlöhner R (2011) Relationships of stable carbon isotopes, plant water potential and growth: an approach to assess water use efficiency and growth strategies of dry land agroforestry species. *Trees*, 25: 95-102.
- Redha A, Suleman P, Al-Hasan R, Afzal M (2012) Responses of *Conocarpus lancifolius* to environmental stress: a case study in the semi-arid land of Kuwait. *Phyton*, 81(1):181-190.

## Analyse probabiliste du comportement élastique de deux essences de bois tropicaux : Influence de la température.

NGUEDJIO Loïc Chrislin<sup>1,2</sup>, MEZATIO Annabelle Kosguine<sup>2</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>3</sup>,  
MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,4</sup>, BLAYSAT Benoit<sup>1</sup>, TALLA Pierre Kisito<sup>2</sup>,  
SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>, GRIL Joseph<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Unité de Recherche de Mécanique et de Modélisation des Systèmes des Physiques (UR-2MSP) ; Département de Physiques, Faculté des Sciences, Université de Dschang, BP 67, Dschang, Cameroun

<sup>3</sup>Université de Limoges, GC2D, UR 14477, Egletons, France

<sup>4</sup>CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

[loic.nguedjio@doctorant.uca.fr](mailto:loic.nguedjio@doctorant.uca.fr)

**Mots clefs :** Bois tropical ; comportement élastique ; analyse probabiliste ; modèle de Weibull ; température.

### Contexte et objectifs

Le bois est considéré comme un matériau composite dans lequel coexistent de nombreux niveaux d'hétérogénéités à plusieurs échelles, pourvu de défauts, distribués et localisés, de taille plus ou moins importante. Ces hétérogénéités se manifestent par des variations spatiales des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau, des variations qui aujourd'hui ne font plus l'ombre d'un doute puisque prouvées expérimentalement (Redjel 2013). En effet, cette constitution intrinsèque du matériau bois a une influence significative sur les paramètres mécaniques et physiques liés à la rigidité des structures en bois. Il convient donc d'associer aux modèles déterministes existants, dédiés à la modélisation du phénomène de rigidité, des approches statistiques et probabilistes qui ont l'avantage de mieux estimer l'importance relative des différentes variabilités influant sur la fiabilité du matériau de construction (Saoud et al 2018). Dans cette étude, une analyse probabiliste de Weibull est utilisée pour tenter de décrire les causes des variabilités observées sur le comportement élastique des essences des bois tropicaux Ayous (*Triplochiton scleroxylon*) et Padouk (*Pterocarpus soyauxii*) de la localité de Gambe dans le centre du Cameroun.

### Matériels et méthodes

#### *Modèle probabiliste de Weibull*

La distribution de Weibull à deux paramètres utilisés est reconnue dans la littérature pour décrire le comportement élastique et la probabilité de rupture des bois tropicaux (Maache et al 2017). La fonction de densité de probabilité du modèle statistique de Weibull à deux paramètres est définie par l'équation (1) (Djehader et al 2019). L'intégration de cette densité de probabilité donne la fonction de répartition cumulée utilisée comme fonction prédictive du comportement élastique du matériau, comme décrit par l'équation (2) (Barbosa et al 2018) :

$$f(x) = \frac{m}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^m} \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^m} \quad (2)$$

avec, m le module de Weibull traduisant l'inhomogénéité de la taille des défauts et le degré de dispersion, a le paramètre de forme de la distribution et x une variable indépendante. Le paramètre m est déterminé en linéarisant l'équation (2) et en déterminant la pente de la droite obtenue (équation (3)) :

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = m(\ln(x) - \ln(a)) \quad (3)$$

Dans cette étude, la variable utilisée est le module d'Young (MOE) et le taux de rigidité axiale représentée par la fonction de répartition F(x) sera donné par l'expression suivante :

$$F(x) = P_r = \frac{i}{N+1} \quad (4)$$

où i est le rang de l'échantillon testé, après classement par MOE croissant, et N la taille de l'échantillonnage.

### Méthode expérimentale

Le module d'élasticité de chacune de nos éprouvettes a été déterminé dans la direction longitudinale des fibres en flexion quatre points. Le dispositif expérimental utilisé est celui de la Fig. 1. Ce dispositif est constitué d'un système de chargement à masses marquées où la contrainte est calculée selon l'équation (5) dans laquelle l = 320 mm est la distance entre les appuis, L = 360 mm la longueur totale de l'éprouvette et h = 20 mm la hauteur de l'éprouvette (NF EN 384), g la pesanteur et m la valeur en kg de la masse utilisée. L'éprouvette se trouve dans une chambre où la température est régulée et maintenue constante à la valeur souhaitée pour un essai donné. Des jauges de déformations collées parallèlement à la direction longitudinale des fibres permettent d'obtenir les déformations de l'éprouvette pour un chargement donnée.

$$\sigma = \frac{3g(L-l)}{2h^3} m \quad (5)$$



Fig.1 : Dispositif expérimental pour la détermination du MOE en fonction de la température.

Pour chacune des deux essences, les éprouvettes ont été testées à des niveaux de température de 25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C et 100°C, respectivement, puis les MOEs calculés en évaluant la pente de la courbe contrainte-déformation correspondante.

### Résultats et discussions

La Fig. 2 nous montre les valeurs du paramètre de Weibull. On observe une dispersion des points expérimentaux autour de la ligne de régression linéaire de l'équation de probabilité pour l'Ayous et le Padouk. Les écarts entre les points expérimentaux et la ligne de régression peuvent être attribués à des défauts dans la structure interne des échantillons testés. Selon (Redjel 2017),

la taille de ces défauts influe sur la résistance du bois et peut initier une rupture, contribuant à la dispersion autour de la ligne de régression. Le module de Weibull, qui indique la dispersion, varie de 9,2057 à 15,621 pour l'Ayous et de 3,409 à 6,1503 pour le Padouk. La gamme inférieure des valeurs du module de Weibull pour le Padouk reflète une répartition très variable des défauts entre les échantillons, conduisant à une large dispersion des mesures expérimentales du module d'élasticité (Brito et al 2023). Le module de Weibull plus élevé pour l'Ayous par rapport au Padouk indique une moindre variabilité dans la dispersion des échantillons d'Ayous. Pour les deux espèces, le module de Weibull est inférieur à 20, une valeur de référence dans la littérature indiquant une dispersion variable entre les échantillons. Ces résultats montrent que le comportement élastique du bois présente une variabilité qui peut être décrite efficacement par un modèle probabiliste de Weibull à deux paramètres.

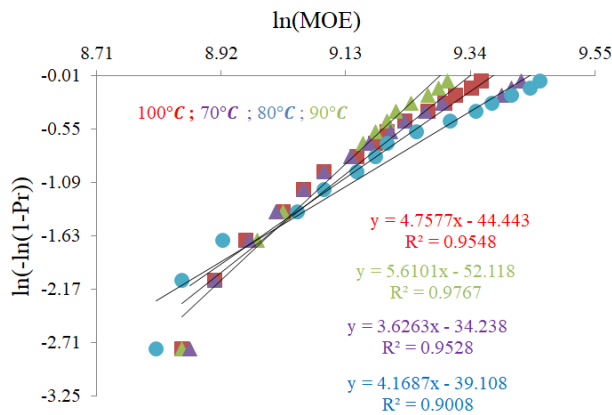


Fig. 2a : Détermination de m : Padouk.

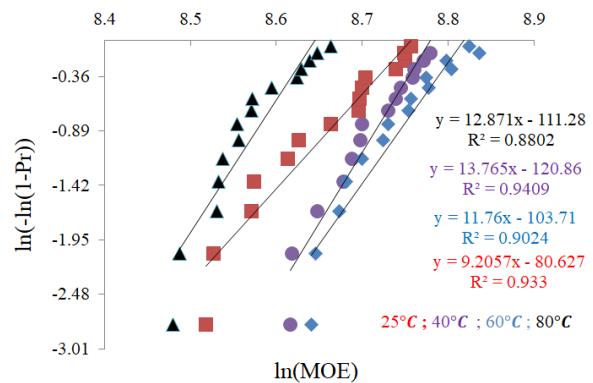


Fig. 2b : Détermination de m : Ayous.

Nous constatons également dans cette étude que le module de Weibull admet une évolution aléatoire par rapport à la température. La température a donc un effet aléatoire sur la dispersion autour de la rigidité axiale de nos échantillons.

## Conclusion et perspectives

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement élastique de deux essences tropicales de bois, le Padouk et l'Ayous. L'étude s'est appuyée sur une analyse probabiliste de type Weibull à deux paramètres et l'effet de la température a été incluse à travers la détermination du module d'élasticité longitudinal. À l'issue de nos investigations, nous pouvons tirer plusieurs conclusions. La distribution de Weibull à deux paramètres décrit efficacement la nature aléatoire de la variabilité du bois tropical. Il a été observé que l'Ayous présente un module de Weibull plus élevé que celui du Padouk, ce qui suggère une plus grande dispersion des indicateurs de rigidité dans l'Ayous. Cependant, les deux espèces présentent des modules de Weibull inférieurs à 20, indiquant une variabilité dans la dispersion des échantillons. La température a exercé une influence significative sur ces paramètres probabilistes, contribuant à leurs caractéristiques aléatoires. De futures recherches exploreront les effets thermiques sur le comportement de ces essences de bois au-delà de leurs limites élastiques. La modélisation déterministe du comportement couplé fissuration-thermo-viscoélastique permettra de mieux comprendre la complexité du bois, facilitant ainsi la conception de structures en bois plus solides et durables.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'UR-2MSP de l'Université de Dschang pour avoir fourni les installations de flexion. Les auteurs remercient également l'ANR via le projet ENR PRCE

DIAM-WOOD, le projet Emergence du programme CAP2025 de l'UCA, le projet WoodMob du CIR ITPS CAP 2025 et le projet IEA CNRS 2024 pour le soutien apporté à ce travail.

### Références

Barbosa J, Correia J, Junior C, De Jesus A (2018) Improvement of fatigue life estimation of composite materials under constant amplitudes loading, In: Portuguese Conference on Fracture, pages 425–463.

Brito T, Ferreira J, Ferreira G, Da Silva J, Mendonça A, Neto H (2023), Physical and mechanical properties of thermally modified short-rotation wood in a closed system, International Wood Products Journal, 14:1–8.

Djehader D, Redjel B (2019) Effect of water absorption on the Weibull distribution of fatigue test in jute-reinforced polyester composite materials, Advanced Composites Letters, 28 :096369351985383.

Maache M, Abderrezak B, Amroune S, Scarpa F, Dufresne A (2017) Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *juncus effusus*, Carbohydrate Polymers, 171 :163–172.

Redjel B (2013), Endommagement et comportement à la rupture au cisaillement de voile de panneau en bois à lamelles orientées OSB sous différents environnements, 21<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Congrès français de mécanique, Bordeaux, France.

Redjel B (2017) Utilisation du modèle probabiliste de Weibull à la caractérisation de l'aspect aléatoire de la rupture en traction de panneaux en bois à lamelles orientées OSB, 23<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Congrès français de mécanique, Lille, France.

Saoud A, Abdelhamid E, Khadija K, Ziani M, Matar M, Chergui M (2018) Technological characterization and correlation between mechanical and physical properties of the wood of thuja (*Tectracanalis articulata*) of the Khemissat region in Morocco, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13:632–637.

## Enhancing wood performance using citric acid and whey ultrafiltration permeate: a promising approach

KERALTA Assira<sup>1</sup>, CHAABENE Sahar<sup>2</sup>, WINNINGER Jérémy<sup>1</sup>,  
CHAMBERLAND Julien<sup>3</sup>, LANDRY Véronic<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Wood and Forest Sciences, Renewable Materials Research Center, Université Laval, Quebec City, Canada, G1V 0A6.

<sup>2</sup> Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, 1080 Tunis Cedex, Tunisie.

<sup>3</sup> STELA Dairy Research Center, Institute of Nutrition and Functional Foods (INAF), Department of Food Science, Université Laval, Quebec City, Canada, G1V 0A6.

[assira.keralta.1@ulaval.ca](mailto:assira.keralta.1@ulaval.ca)

**Keywords:** Wood modification, polyesterification, whey ultrafiltration permeate.

### Context and objectives

Wood is increasingly valued for its environmental benefits, including carbon sequestration, recyclability, and aesthetic appeal. However, its hygroscopic nature limits its applications where stability and durability are critical. Traditional materials like concrete and steel, despite their environmental drawbacks, outperform wood in these areas. Wood's tendency to deform, crack, and degrade under varying humidity, exposure to microorganisms, and UV light necessitates effective treatment methods. One promising approach is polyesterification (Berube et al 2018, Kurkowiaw et al 2022), where wood is impregnated with acids and alcohols, and the esterification reaction is carried out in situ to densify wood cell wall. This study investigates an innovative application of whey ultrafiltration (UF) permeate, a dairy coproduct containing lactose and minerals (Baldasso et al 2011, Chamberland et al 2020) as a replacement for traditional alcohols used in this process. The goal is to leverage the abundance and biosourced nature of whey UF permeate to improve wood's dimensional stability and moisture resistance. Preliminary results indicate that polyesterified wood with citric acid and whey UF permeate exhibits significant improvements in these properties. Further research will focus on the wood's resistance to fungal attack and color stability under various conditions.

### Materials and methods

Citric acid (CA)  $\geq 99.5\%$ , was purchased from Sigma Aldrich (Oakville, ON, Canada) and used as received. Whey UF permeate and lactose ( $>99.0\%$ ) powders were provided by Agropur (Longueuil, QC, Canada). Whey UF permeate contained 88% lactose, 5.8% ash, 2% non-protein nitrogen on a dry basis, and 4% w/w moisture. Trembling aspen (*Populus tremuloides L.*) wood was prepared by sawing solid wood pieces to the desired size as presented in Table 1. The samples were stored in a conditioning room (21 °C, 41% RH) before treatment.

#### Wood Treatment Process

After the formulation preparation, ten block wood samples were immersed in the formulation, and a weight was put on the top to maintain the samples immersed in the formulation. They underwent a dynamic vacuum at 50 mbar in a desiccator for 1 h; afterward, the vacuum was cut, and samples were maintained immersed in the formulation at atmospheric pressure and ambient temperature to absorb the formulation for 24 h. They were then removed from the formulation, and a paper was used to remove the excess solution. Samples were weighted, and their dimensions were measured. The treatment process is summarized in Fig. 1. The



formulation WUPAC consists of an aqueous mixture of CA and whey UF permeate with a total solid content of 596 g/L.

Table 1: Wood sample dimensions and sampling for the different tests performed.

Sample size (T × L × R) mm <sup>3</sup>	Tests or analysis performed	Number of samples per treatment
25 × 25 × 10	Density, SU*, WGP*, CWB*, ASE*	10
4 × 4 × 2	Thermogravimetric analysis, infrared spectroscopy	2
50 × 50 × 10	Density profile	3
5 × 5 × 5	Sorption isotherms	2

SU\*: solution uptake - WGP\*: weight gain percentage - CWB\*: Cell wall bulking - ASE\*: Anti-swelling efficiency.

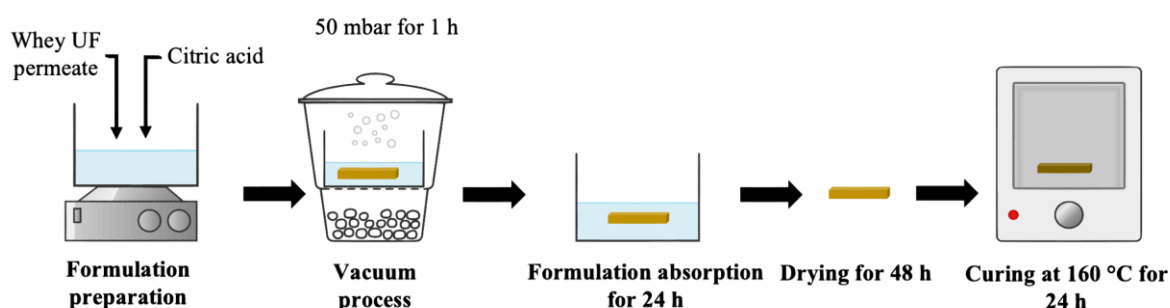


Fig. 1: Wood treatment process

#### *Physical characterization of the wood samples*

After the impregnation process, the penetration of the solution into the wood samples was assessed and presented as solution uptake (SU). The impregnation process was followed by a curing step at 160 °C. The rate of solids gained or lost by the sample was calculated and presented as weight gain percentage (WGP). The cell wall bulking (CWB) due to the formation of polymers in the cell wall and the anti-swelling efficiency (ASE), which is the gain in dimensional stability after treatment, were calculated and compared to samples treated with water alone. Mean and standard deviation were used to plot each of these physical properties.

The density profile was measured before and after treatment on the sample. An X-ray densitometer QPD-01X (Quintek Measurement Systems, Knoxville, TN, USA) was used to measure the density profile. The density was measured at intervals of 0.02 mm through the specimen's thickness in the radial direction. Three samples for each treatment were used, and the mean was used for the plot.

#### *Chemical characterization of the wood samples*

Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy analysis was conducted using the Invenio R spectrometer (Bruker, Billerica, MA, USA) to assess the effectiveness of the reaction inside wood. Spectra were recorded on the untreated samples, water-treated samples, and samples treated with the WUPCA formulation. Spectra were obtained by accumulating 32 scans in the 400 to 4000 cm<sup>-1</sup> region with a resolution of 4 cm<sup>-1</sup>. The OPUS software (Bruker, Billerica, MA, USA) was used to process the spectra.

#### *Thermal characterization of the wood samples*

Thermogravimetric analyses were performed using a TGA 851e (Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland) to assess the thermal degradation of treated samples and the impact of curing

temperature on the thermal properties of the samples. The temperature was raised from 35 °C to 800 °C at a rate of 10 °C/min under a nitrogen flow of 100 mL/min. Each sample was tested two times.

### *Hygroscopic characterization*

Sorption isotherm tests were conducted using a DVS Adventure water vapor sorption analyzer (Surface Measurement Systems, Allentown, USA) at 25 °C. The samples were first dried at 0% RH until the mass change of the specimen per minute ( $dm/dt$ ) was  $<0.001\% \text{ min}^{-1}$  over a period of 10 min and then exposed to an RH of 95% for 720 min. This was done to limit the potential influence of the previous sorption history on the sorption isotherms, which has been observed when comparing multiple sorption cycles (Majka et al 2016). Afterwards, the samples were dried again at 0% RH before the RH was increased stepwise in the following sequence: 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95% RH (absorption curve), which was followed by a decrease to 0% RH in the reverse order (desorption curve). The RH in the analysis chamber was maintained until the sample's mass percentage varied by less than 0.0002% over 10 minutes or the step duration exceeded 24 h. The moisture content during adsorption and desorption cycles was plotted against the target RH. Two repetitions were performed on each type of sample.

## Results and discussion

### *Physical properties*

Fig. 2 presents the SU of water (used as reference) and WUPCA formulation by trembling aspen samples. WUPCA formulation was absorbed as much as water by the samples, even it is quite higher than the absorption of water (Fig. 2a). This difference in solution uptake between water and WUPCA is explained by the difference in oven-dry density. Samples impregnated with water were quite denser than those impregnated with WUPCA formulation (Fig. 2b). After curing at 160 °C following the impregnation process, samples impregnated with water had a weight loss of around 1%, which could be attributed to the leaching of extractives by hot water. Samples treated by WUPCA had a gain weight percentage of around 40%, which corresponds to the amount of solids components formed between whey UF permeate and CA (Fig. 2a). This could be seen in the density; samples treated with water had almost the same density. In contrast, samples treated with WUPCA gained in density after the treatment due to the products formed in wood between CA and whey UF permeate.

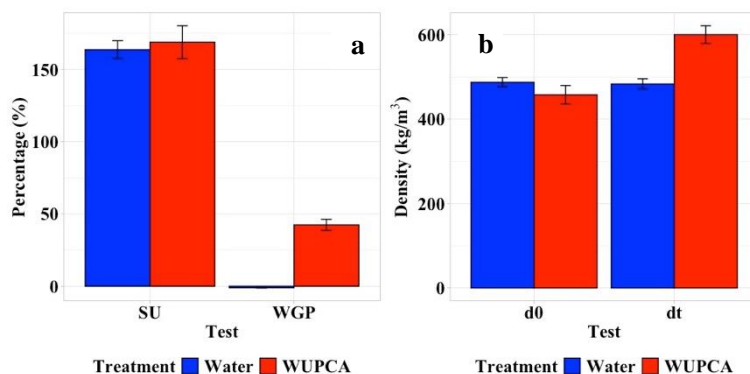


Fig. 2: Comparison of the solution uptake (SU) and weight gain percentage (WGP) (a) and density of water-treated and WUPCA-treated samples.

The density profile presented in the Fig. 3 showed that the treatment was almost homogeneous throughout the entire thickness of the samples. The density profile remained the same after the treatment with water, showing that the curing temperature did not affect the wood density throughout its entire thickness.

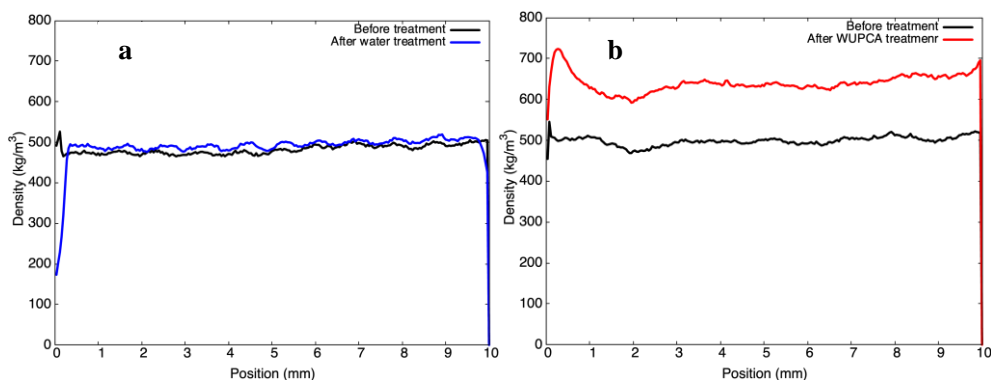


Fig. 3: Comparison of the density profile before and after treatment for water-treated (a) and WUPCA-treated (b) samples.

### *Chemical composition changes*

Untreated, water-treated, and WUPCA-treated samples were analyzed by FTIR and presented in Fig. 4. Firstly, the bands of the main wood components (cellulose, hemicellulose, and lignin) did not change, meaning that the curing temperature did not affect these polymers, and the WL observed could be definitively attributed to the loss of extractives. For WUPCA-treated samples, there is a deep increase in the band intensity at  $1733\text{ cm}^{-1}$  assigned to C=O esters, meaning that CA and the lactose in whey UF permeate reacted together in wood. There is also a decrease in the band intensity at  $3320\text{ cm}^{-1}$  assigned to OH, meaning there might be a reaction between OH groups of wood and CA.

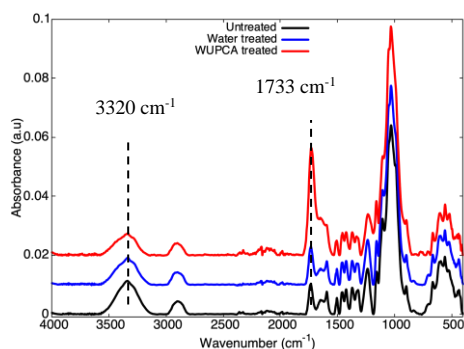


Fig. 4: FTIR spectra comparison of untreated, water-treated, and WUPCA-treated samples.

### *Thermal properties investigation*

The initial pyrolysis temperature remains unchanged with water treatment. However, a decrease in the initial pyrolysis temperature is observed following WUPCA treatment (Fig. 5a). Additionally, the residual mass after analysis at  $800\text{ °C}$  is higher for WUPCA-treated samples, while untreated and water-treated samples exhibit the same residual mass as untreated wood. This could be attributed to the presence of other components in whey UF permeate, particularly minerals, which may lower the initial pyrolysis temperature by accelerating the dehydration process and promoting the formation of a significant amount of char (Hagen et al 2009).

### *Hygroscopic behavior of wood samples*

Fig. 6 shows the sorption isotherms of untreated, water-treated, and WUPCA-treated samples. All isotherms exhibited a type II pattern, which is typical for wood (Niemz et al 2023, Anwar et al 2021). However, the WUPCA-treated samples demonstrated lower sorption across the entire hygroscopic range compared to the untreated samples. This reduction is likely due to the occupation of absorption sites in the wood by the products formed between citric acid (CA) and lactose in the whey UF permeate. For the water-treated samples, there was a slight decrease in

adsorption, possibly due to the removal of some hydrophilic extractives during the heat treatment.

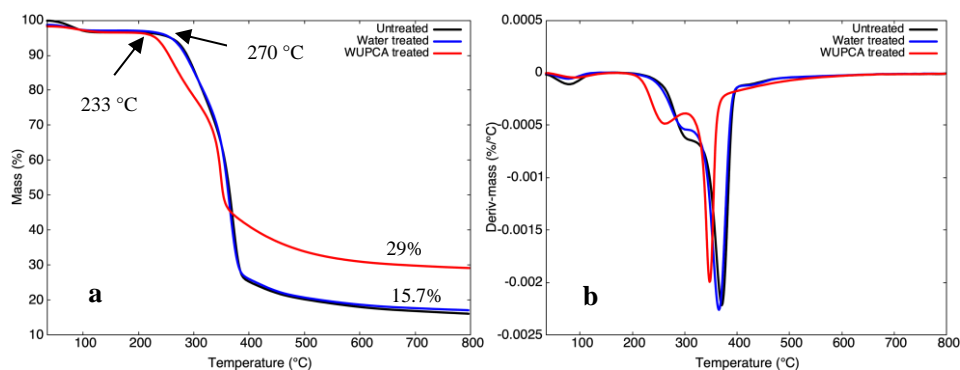


Fig. 5: Comparison of the thermogravimetric analysis (a) and its derivative (b) of untreated, water-treated, and WUPCA-treated samples.

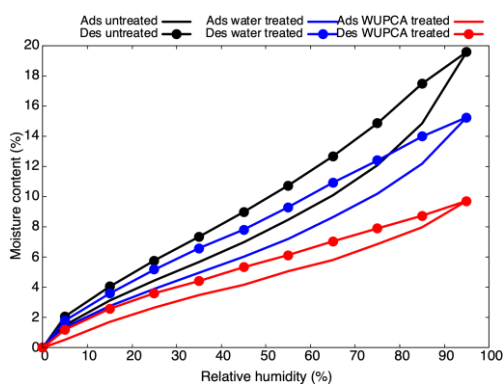


Fig. 6: Comparison of sorption isotherms of untreated, water-treated, and WUPCA-treated samples.

### Expected results

- There was a notable increase in density throughout the entire thickness of the samples. This density increase is expected to enhance the mechanical properties of the wood, as many wood mechanical properties are proportional to density.
- The moisture content of the wood was significantly reduced across the entire hygroscopic range after treatment, suggesting improved resistance to fungal attack. Previous studies have shown that wood's resistance to fungi is related to its ability to exclude moisture after treatment (Thybring Emile Englund 2009).
- Long-term stability and durability of the treated samples are anticipated, owing to the stability of the compounds formed within the wood."

### Conclusion and perspectives

This study shows the potential of whey UF permeate in enhancing wood properties. The lactose in whey UF permeate can react with citric acid inside trembling aspen wood, resulting in a higher densification of the cell wall. The cell wall bulking leads to an increase in density through the entire wood thickness and a deep increase of the dimensional stability. Most importantly, there is also a deep decrease in the moisture content of treated wood compared to untreated during the sorption isotherm test. This process offers substantial benefits for both the dairy and wood industries in Quebec and Canada. This process also presents a promising opportunity to add value to the primary co-products of the dairy industry, while simultaneously enabling the development of innovative wood products.

## Acknowledgments

We would like to thank the Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologie (FRQNT) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for funding this project through the NOVA program. We would also like to thank all the technicians and members of the Renewable Materials Research Center.

## References

Berube M-A, Schorr D, Ball R J, Landry V, Blanchet P (2018) Determination of In Situ Esterification Parameters of Citric Acid-Glycerol Based Polymers for Wood Impregnation, *Journal of Polymers and the Environment*, 26(3), 970–979.

Kurkowiak K, Mayer A K, Emmerich L, Militz H (2022) Investigations of the Chemical Distribution in Sorbitol and Citric Acid (SorCA) Treated Wood—Development of a Quality Control Method on the Basis of Electromagnetic Radiation, *Forests*, 13(2), 151.

Baldasso C, Barros T C, Tessaro I C (2011) Concentration and Purification of Whey Proteins by Ultrafiltration, *Desalination*, 278(1–3), 381–386.

Chamberland J, Bouyer A, Benoit S, Provault C, Bérubé A, Doyen A, Pouliot Y (2022) Efficiency Assessment of Water Reclamation Processes in Milk Protein Concentrate Manufacturing Plants: A Predictive Analysis, *Journal of Food Engineering*, 272. 109811.

Majka J, Czajkowski L, Olek W (2016) Effects of Cyclic Changes in Relative Humidity on the Sorption Hysteresis of Thermally Modified Spruce Wood, *BioResources*, 11, 5265–5275.

Hagen M, Hereid J, Delichatsios M A, Zhang J, Bakirtzis D (2009) Flammability Assessment of Fire-Retarded Nordic Spruce Wood Using Thermogravimetric Analyses and Cone Calorimetry, *Fire Safety Journal*, 44(8), 1053–1066.

Niemz P, Teischinger A, Sandberg D, (2023) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*; Eds.; Springer Handbooks; Springer International Publishing: Cham, 2069 p.

Anwar Uyup M K, Sahari S H, Jalaludin Z, Husain H, Lee S H, Yusoh A S (2021) Water Vapour Sorption Behaviour and Physico-Mechanical Properties of Methyl Methacrylate (MMA)- and MMA–Styrene-Modified Batai (*Paraserianthes Falcataria*) Wood, *Holzforschung*, 75(5), 444–451.

Thybring, E. E (2013) The Decay Resistance of Modified Wood Influenced by Moisture Exclusion and Swelling Reduction, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82, 87–95.

## Grasping the craft of cladding facades with wood: alder as a case study.

BRUN Géraldine<sup>1</sup>, ALMEVIK Gunnar<sup>1</sup>, JOHANSSON Karin<sup>1</sup>, BJÖRLING Nils<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Conservation, University of Gothenburg

<sup>2</sup>Chalmers University of Technology

[geraldine.brun@gu.se](mailto:geraldine.brun@gu.se)

**Key words:** Alder, wood cladding, craft, durability, historical literature, regenerative architecture.

### Background and goals

Already in antiquity, alder had proved to perform well underwater while being non-durable above the ground (Vitruvius 1547). Today, the European standard EN 350:2016 informs us that black alder (*alnus glutinosa*) is not durable to attack by termites, not resistant to *trichoferus holosericeus*, and prone to decay from basidiomycete fungi and soft rotting micro-fungi. The latter is determined either by observing the mass loss when contaminated by the organism, or by looking at the longevity of stakes in ground-contact (EN 350:2016).

My observations of crafted wood claddings in France and Scandinavia completed by literature review revealed that alder has been used in different places as a building envelop material. Fig. 1 shows a cladding in Champagne, where the tradition of using black alder as a façade material is today marginal. Fig. 2, 3, and 4 show different alder claddings in a region of Sweden, where only few objects have been identified. In another area of Sweden and in Finland, alder has been used to craft shingles for the roofs of churches and belfries (MiGo:byggnadsvård 2020).

Alder seems to have been chosen for outdoor use in architecture in multiple locations, even though it is recognized as non-durable. The use of species ranked as non-durable in EN 350 is disapproved for cladding purposes by French recommendations, thus panels of conifers or other non-local species are taking over in Champagne. Before it disappears, I see the need to learn from the craft of cladding facades with alder and to answer the question: can alder wood be more durable than expected outdoor or can claddings of non-durable wood perform well?



Fig. 1: shiplaps on a barn, Champagne. Photo by the author.



Fig. 2: boards on an outhouse, Västra Götaland. Photo by the author.



Fig. 3: inbuilt boards on a house, Västra Götaland. Photo by R. Carlsson.



Fig. 4: inside of boards on boards on a barn, Västra Götaland. Photo by R. Carlsson.

## Approach and methods

Previous research on pre-industrial building craft has taught us how to develop sustainable constructive solutions, for example stone adhesive based on wood tar (see Ebert 2024), as well as inspired design solutions, for example in the case of wooden bridges (see Kromoser et al 2024). My research attempts to grasp the potential that the craftsmen's skills and knowledge have in helping us developing sustainable and regenerative design solutions for wood claddings. Through the case study of alder as a cladding material, I investigate how both our immaterial and built heritages can be used to reactivate traditional know-how of interest. Historical literature and field observations with craft analysis are the main sources of information.

To conduct craft analysis, I solicited professionals of the built heritage. In Sweden, I got the support of the craft researcher-practitioner Robert Carlsson for observations and discussions. In Champagne, the practitioner Laurent Roussel and the built heritage technician Jean-Marc Marande guided my fieldwork and my interpretations. The species identification was confirmed with microscope because alder wood is hard to recognize when weathered (Lindblad et al 2023).

To make sense of my observations and grasp the explanations from the practitioners, I started to make alder cladding elements by hewing and hand-planing boards and splitting shingles at the craft laboratory in Mariestad, Sweden (see Fig. 5 to 8). Finally, I attempted to get a broader knowledge of alder, both by experiencing its properties through carving, and by understanding its diverse uses through reading archaeological reports.



Fig. 5: hewing the edge of a board, photo by the author.



Fig. 6: planing a board by hand, photo by the author.



Fig. 7: hewing the surface of a shingle, photo by the author.

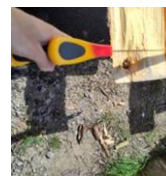


Fig. 8: cutting away a dead knot with a handsaw, photo by the author.

## Results and discussion

### *Alder claddings typologies*

In Champagne, claddings of *tavillons* are generally found on the buildings' west facades to protect the oak posts and the wattle-and-daub filling from erosion by the rain. To resist mechanical abrasion, the thin shiplap boards are kept in place by vertical battens (see Fig. 1) which cover the joints and limit the vibrations from the wind. Without those battens, the erosion of alder around the fasteners results in the boards detaching from the wall (Brun 2023). Tab. 1 shows the general characteristics of the observed claddings of alder both in France and Sweden.

Table 1: Observed cladding typologies.

Location	Cladding type	Dimensions (m)	Coating	Illustration
Champagne	Horizontal shiplaps	0,012x0,15	Raw or motor oil	Figure 1
Västra Götaland	Board on board	0,021/0,027x0,19	Apparently raw	Figure 2
Västra Götaland	Boards and battens	0,026x0,15	(Oil?) paint	Figure 3
Västra Götaland	Board on board	0,025x0,1/0,3	Breathable paint	Figure 4

### *Alder peculiarities*

In Swedish woodlands, alder and spruce are often found together (Hallander 1930, Herlitz 1932) and it seems like they have been perceived as equivalent for cladding the barn shown on

Fig. 4. Aspen is also found used together with spruce in Västra Götland (R. Carlsson, personal communication, April 2023). In Champagne, observed *tavillons* were made of alder, oak, or poplar. Alder deforms less than oak and poplar, possibly because it shrinks little (Gaudin et al 1999) and is the deciduous species with the straightest trunk (Grindhal 1941).

Another advantage of alder for cladding is that it is easy to process and lightweight (Herlitz 1932). It is also claimed to not be prone to cracking (Gibaja et al 2024, Mahn 1855). Anyhow, my field observations show that alder boards tend to crack in the ends. Alder shingles split from green wood were found to crack under drying for thicknesses under five millimetres (MiGo:byggnadsvård 2020). Also, some of the twenty-two millimetres boards sawn for my craft experiment presented a crack on the top end while some of the twelve millimetres boards cracked on the root end during drying in a cold ventilated room (see Fig. 9 and 10). The stocks were sawed rapidly after taking down the trees and the tension in the wood damaged the blade as shown on Fig. 11. Few sawmills know that alder stocks should rest for several months after falling and before sawing to let the tension dissipate (P. Jeuneux, personal communication, February 2024). A hypothesis is that alder boards or shingles crack due to tensions in the wood when the stocks did not rest for long enough.

Roussel (personal communication, July 2023) recommends installing alder shiplaps half dry instead of waiting to obtain a lower level of sixteen percents of moisture in the wood as for other species. According to the craftsman Nils Andersson, alder claddings perform best on north facades and should stay uncoated (R. Carlsson, personal communication, April 2023).

#### *Alder claddings sustainability*

Fifty years old alders normally give timbers of good dimensions (Hallander 1930). Older trees grow much slower (Mahn 1855, Herlitz 1932) and tend to rot in the centre according to Roussel who selects trees about fifty years old for panels (personal communication, July 2023).

Raw panels of alder over seventy years old have been observed in Champagne, some of them in a good shape, some other presenting cracks and erosion around fasteners (Brun 2023). Both Roussel and Marande (personal communication, 2024) have observed that weathering forms a hard layer on alder wood which, they assume, makes the wood naturally durable. They added that alder claddings perform well in humid climates, while conifers' wood behaves better in drier conditions (personal communication, 2024). Anyhow, after a few months on a north wall at the craft Laboratory, fungi colonized the surface of the sawn alder panels (see Fig. 12). Alder wood is particularly smooth (Linnaeus 1749), and its surface should be less prone to fungal attacks than rough woods. Planning it would be a good way to obtain an even smoother surface.

Alder is a well-represented archaeological wood often found used in humid environments like in Crannogs in Scotland (Crone 1988) or in platform settlements and pile dwellings in Italy (Grassi and Mangani 2015, Perini 1984). Several archaeologists performing xylography on alder noted how rapidly the blades get worn. This was also experienced by a craftsperson when planning alder wood. They agree that it seems like alder absorbs and fixes minerals, which might be another factor explaining the damaged sawmill blade on Fig 11. Mahn provides a recipe to improve alder durability by iron impregnation: "Split a shingle from a mature alder and bury it in waterlogged ground, for example in a bog containing bog iron, and leave it there for three years to obtain a durable roofing material" (Mahn 1855, translation by the author).

Finally, black alder is a fast-growing species well distributed in Europe, possibly explaining its use in construction. Also, near rivers or lakes shores, as well as in marshes, it often represents the only alternative for wood production (Grindhal 1941, Hallander 1930).





Fig. 9: pith crack on the top end of a twenty-two millimetres board, photo by the author.



Fig. 10: pith crack on the root end of a twelve millimetres board, photo by the author.



Fig. 11: damaged teeth of the sawblade, photo by Mats Karlsson.



Fig. 12: fungi colonization on the cladding at the craft laboratory, photo by the author.

## Conclusion and perspectives

The preliminary results indicate both that alder wood can be more durable than expected outdoor and that cladding made of non-durable wood can perform well. Unlike for spruce or oak, there is no evidence that a cladding of alder can last for centuries. Anyhow, a durability of seventy years overreaches the time of natural resource replenishment, meaning that cladding a façade with alder can be sustainable and relevant for regenerative architecture. Cladding facades durably with alder requires a specific knowledge which I haven't grasp totally yet. The issue of cracking and the question of improved durability by natural impregnation must be further studied. This will be done through the next stages of my craft experiment; by extending my literature review, and during coming fieldwork in Thiérarche region where alder is traditionally used for cladding as well (Claessens 2006, Gaudin et al 1999, Streith 1989).

The use of alder wood requires the adaptation of the production chain and project pace. The impossibility to work in *flux tendus* and the difficulty to exploit a resource in wet environments make alder noncompetitive. Anyhow, to foster resilience and diversity in both our built and natural environments, it is important to give priority to local craft in decision making processes. This is possible in small projects like the construction of detached or semi-detached houses which represent over half of the housing in Europe (Eurostat), or potentially in the public sector.

## Acknowledgements

The research was financed by the institution of conservation at the University of Gothenburg. The fieldwork was partly founded by the Adlerbertska Research Foundation.

## References

- Brun G (2023) When Wood Cladding Degenerates: Lessons on durability from traditional wood claddings after long weathering in real conditions. FORMakademisk, 16(4).
- Claessens H (2006) Réflexion sur la place de l'aulne en sylviculture. Forêt wallonne 80.
- Crone BA (1988) Dendrochronology and the study of crannogs. [Doctoral dissertation]. University of Sheffield.
- Ebert B (2024) Learning from the Past: Rediscovering Traditional Medieval Wood Tar Adhesives for Sustainable Stone Conservation and Built Heritage. Studies in Conservation, 1-9.
- Eurostat (2021) House or flat: where do you live? Eurostat.
- Gaudin S, Labbe S, Lebleu, G (1999) L'aulne glutineux en Champagne-Ardenne. Etude réalisée pour le compte du CRPF Champagne-Ardenne. CRPF Champagne-Ardenne. Châlons en Champagne, France. 47p.

Gibaja JF, Mineo M, Santos FJ, Morell B, Caruso-Fermé L, Remolins G, Masclans A, Mazzucco N (2024) The first Neolithic boats in the Mediterranean: The settlement of La Marmotta (Anguillara Sabazia, Lazio, Italy). *Plos one*, 19(3), e0299765.

Grassi B, Mangani C (2015) Guida alla palafitta di Bodio centrale o delle Monete. Grassi B, Mangani C (Eds.).

Grindhal T (1941) Al. Eken. *Skogsägaren*, 17. Jönköping, p. 262–264.

Hallander Å (1930) Klibbalen, ett förbisett trädslag. *Skogsägaren*. Jönköping, p. 186–187.

Herlitz N (1932) Om alen i sydsvenskt skogsbruk. *Skogsägaren*, 8. Jönköping, p. 123–126.

Kromoser B, Spitzer A, Ritt M, Grabner M (2024) Wooden Bridges: Strategies for Design, Construction and Wood Species—From Tradition to Future. *International Journal of Architectural Heritage*, 18(4), 652-668.

Lindblad L, Melin KM (2023) Field Method for Characterization of Deciduous Wooden Shingles. *FORMakademisk* 16(4).

Linnaeus C (1749) *Flora oeconomica eller Hushållsnyttan af de i Sverige wildt växande örter*.

Mahn JHF (1855) *Sveriges löfskogar, deras plantering, vård, nytta och mångfaldiga användbarhet i landthushållningen, medicine m.m.*. Stockholm.

MiGo:byggnadsvård (2020) Slutrapport för projekt byggarbete i virket al. Länsstyrelsens diarienummer 8423-2019.

Perini R (1984) Scavi archeologici nella zona palafitticola di Fiavé-Carera. 1. Situazione dei depositi e dei resti strutturali: campagne 1969-1976. Servizio Beni Culturali della Provincia Autonoma di Trento.

SS-EN 350 (2016) Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials.

Streith M (1989) *L’habitat. L’élèveage. La thiérarche rurale et herbagère*.

Vitruvius Pollio M (1547) *Le premier livre d'architecture* (J. Martin, Trans.). Michel de Vascosan (Ed).

## Mise au point de formulations biosourcées innovantes à base de polyuréthanes sans isocyanate comme produit de traitement du bois

VINCHELIN Pierre, GERARDIN Philippe, FREDON Emmanuel

LERMAB (Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois), Université de Lorraine, France

[pierre.vinchelin@univ-lorraine.fr](mailto:pierre.vinchelin@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** imprégnation du bois ; préservation du bois ; *non-isocyanate polyurethane* ; adhésifs ; finitions ; modification chimique du bois

### Contexte et objectifs

Le bois est un matériau d'origine biologique dont l'emploi est courant en structure. Étant hygroscopique, ses interactions avec l'eau sont fortes et peuvent engendrer des variations dimensionnelles ainsi qu'un risque de dégradation par les agents de dégradation du bois et donc à terme des détériorations mécaniques. Dans le but de protéger le bois des attaques biologiques, de nombreux traitements biocides ont été développés et demeurent encore aujourd'hui très utilisés. Le problème majeur avec les traitements biocides classiques est leur toxicité vis-à-vis de l'homme et de l'environnement (Hill 2006, Rowell 2013). De nouvelles alternatives de traitement ont été mises au point pour pallier la toxicité des traitements de préservation du bois. Ces nouvelles méthodes, qualifiées de « non biocides », sont divisées en deux catégories : le traitement thermique et la modification chimique. Elles visent à éliminer ou masquer les sites de sorption de l'eau du bois (notamment les groupements hydroxyles –OH des hémicelluloses, un des trois polymères pariétaux du bois avec la cellulose et la lignine). Le traitement thermique du bois consiste en une dégradation contrôlée du matériau par chauffage (notamment des hémicelluloses riches en groupements hydroxyles). La modification chimique peut être une imprégnation de composés polymérisant *in situ* dans le bois ou de composés modifiant chimiquement la structure des polymères pariétaux en se greffant aux groupements hydroxyles (Zelinka et al 2022).

Le projet de thèse s'inscrit dans une démarche de développement durable en proposant des solutions biosourcées et innovantes de modification chimique du bois. Actuellement, les bois modifiés constituent encore un marché de niche et seules quelques solutions sont industrialisées (e.g. bois acétylé et furfurylé) (Hill 2006, Rowell 2013). Lorsqu'un traitement de modification chimique est mis en place, le bois est protégé contre les attaques biologiques et devient moins sensible aux variations dimensionnelles mais peut néanmoins devenir plus cassant (Kurkowiak et al 2022). Pour corriger cela, les polymères dénommés *NIPU* (*non-isocyanate polyurethanes*) sont investigués. Ce sont des polymères souples (élastomères), pouvant polymériser à basses températures, n'utilisant pas de monomères toxiques comme les polyuréthanes classiques (i.e. diisocyanates) et étant imprégnables en phase aqueuse, évitant l'utilisation de solvants organiques et de monomères ou catalyseurs acides pouvant altérer le matériau. Le bois utilisé est le hêtre commun (*Fagus sylvatica* L.), une essence facilement imprégnable, faiblement durable et locale, pouvant contribuer à la réduction de l'empreinte carbone en limitant l'utilisation et l'importation d'essences tropicales.

### Matériel et méthodes

*Synthèse organique*

Deux voies ont été étudiées pour synthétiser le polymère de *NIPU* : en une ou deux étapes (Fig. 1). La réaction entre les différents monomères va donner des motifs hydroxyuréthanes, qui polymériseront ensuite entre eux pour former le *NIPU* par polyaddition. Chimiquement parlant, les *NIPU* sont des polyhydroxyuréthanes (polyuréthanes possédant des groupements hydroxyyles).

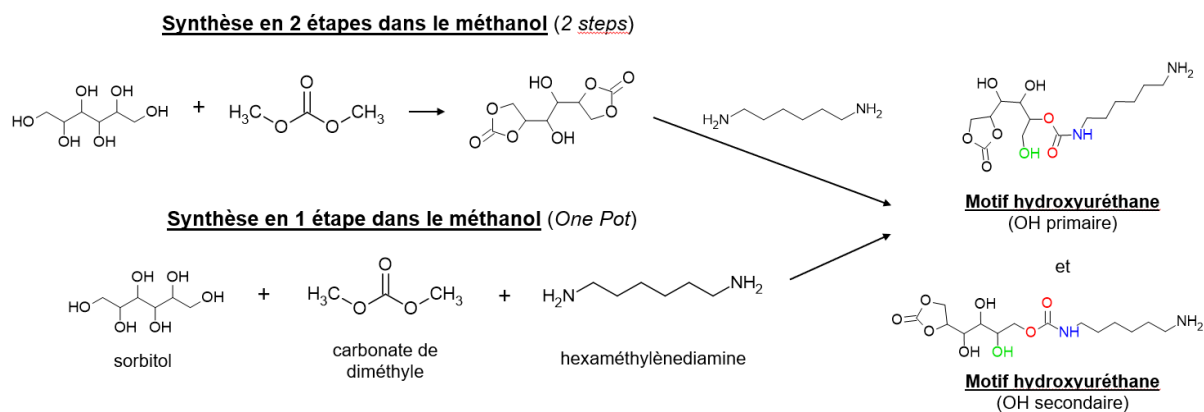


Fig. 1 : voies de synthèse des motifs hydroxyuréthanes

Les réactifs biosourcés et non toxiques sont préférentiellement utilisés dans notre approche. Les essais préliminaires ont été menés avec le sorbitol (polyol), le carbonate de diméthyle et l'hexaméthylènediamine (diamine). Pour s'inscrire dans le cadre du respect des principes de la chimie verte, des conditions de réactions « douces » de pré-polymérisation sont choisies : 50°C pendant 1h, avec ou sans catalyseur ( $K_2CO_3$ ), méthanol (solvant de réaction). Le produit formé est analysé par spectroscopie dans l'infrarouge moyen (MIR) pour confirmer la formation des groupements hydroxyuréthanes.

### Modification du bois

Des petites éprouvettes de dimensions suivantes ont été débitées dans des planches de hêtre selon les trois directions de référence du bois : longitudinale (2,5 cm) ; tangentielle (1,5 cm) et radiale (0,5 cm).

Pour l'imprégnation des *NIPU* synthétisés, les éprouvettes anhydres sont immergées dans une solution aqueuse de *NIPU* à 50% dans des béciers en verre à l'intérieur d'une cloche à vide. Le vide est appliqué pendant 20 min suivi d'un trempage de 1h ou 2h. Les échantillons sont systématiquement traités en triplicats. Différentes conditions sont testées : imprégnation du *NIPU* seul, avec ajout de catalyseurs (PC = carbonate de potassium ou TBD = triazabicyclodécène) ou d'un réticulant (GDE = glycérol diglycidyle éther) dans la solution d'imprégnation. Après l'imprégnation, les éprouvettes sont placées à l'étuve à 80°C pendant 24h, température compatible avec le maintien de l'intégrité du *NIPU*, contrôlé par MIR. Les éprouvettes sont enfin lessivées à l'eau pendant une semaine en s'inspirant de la norme NF EN-84, pour étudier la rétention du produit dans le bois.

### Résultats

Le carbonate de sorbitol et le *NIPU* ont bien été synthétisés comme l'atteste leur bande respective à 1773  $cm^{-1}$  (carbonate cyclique) et 1693  $cm^{-1}$  (motif uréthane) (Fig. 2). Le bois de hêtre natif montre une bande carbonyle (C=O) à 1730  $cm^{-1}$  et les bois modifiés avec les *NIPU* une bande uréthane à 1693  $cm^{-1}$ , prouvant que le produit a bien été imprégné (Fig. 3). Des bandes similaires sont retrouvées chez le hêtre modifié par des *NIPU* de structure différente à

base de polyglycérol par Dumarçay et al (2015) :  $1780\text{ cm}^{-1}$  pour le carbonate cyclique et  $1704\text{ cm}^{-1}$  pour le *NIPU*.

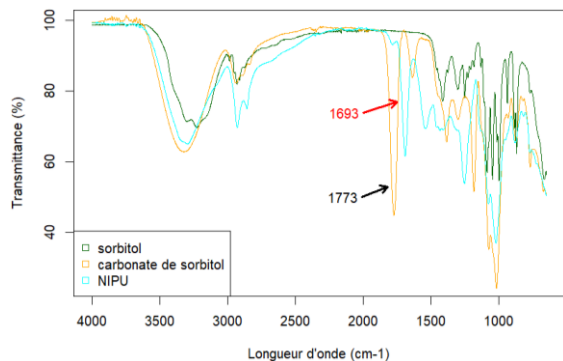


Fig. 2 : spectres infrarouges des produits obtenus hors du bois

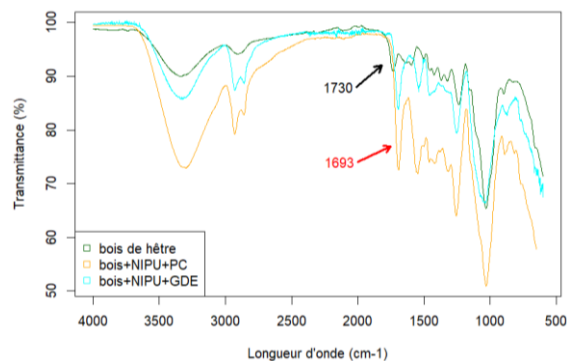
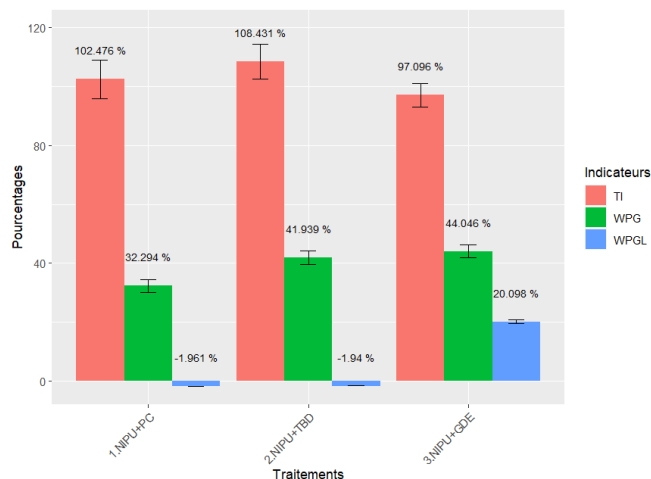


Fig. 3 : spectres infrarouges du bois témoin et des bois traités

Des taux d'imprégnation satisfaisants, proches de 100%, ont été atteints pour chaque traitement, ce qui était attendu avec le bois de hêtre, une essence très imprégnable. Des gains de masse après séchage satisfaisants sont également reportés, jusqu'à 44% avec le traitement NIPU+GDE (Fig. 4). Ces taux sont similaires à ceux obtenus par Chabert et al (2022) pour la même essence avec des polyesters : 117,3% d'imprégnation et 37,8% de gain de masse. Les taux de lessivage sont très élevés pour les traitements NIPU+PC et NIPU+TBD, l'ajout de catalyseur dans la solution d'imprégnation ne semble donc pas permettre une polymérisation supplémentaire du produit dans le bois. Le taux légèrement négatif correspond probablement à la perte de masse des éprouvettes due aux extractibles hydrosolubles, non retirés avant traitement. L'ajout d'un réticulant (GDE), permet de retenir 45,6% du produit dans le bois après un lessivage à l'eau d'une semaine (Fig. 4). Dumarçay et al (2015) ont également obtenus des taux de lessivage assez élevé pour des bois modifiés avec des *NIPU*.



Fi. 4 : Indicateurs de modification chimique des éprouvettes de bois de hêtre (TI = taux d'imprégnation, WPG = gain de masse, WPGl = gain de masse après lessivage) avec différents traitements

Le traitement NIPU+GDE permet d'obtenir un produit gélifiant à température ambiante, pouvant expliquer la rétention de près de la moitié du produit dans le bois. Pour le bois modifié, les parois des vaisseaux sont enduites de produit et les parois des fibres semblent saturées puisque leurs lumens ne sont quasiment plus discernables comme chez le bois témoin (Fig. 5).

Pour la suite des travaux, l'amélioration de la rétention du produit dans le bois sera primordiale et plusieurs approches seront investiguées : jouer sur le solvant d'imprégnation, rajout de réactifs dans la solution d'imprégnation (carbonate et amine notamment) pour favoriser la

polymérisation ou utilisation d'amines plus hydrophobes. Lorsque la rétention de *NIPU* sera jugée satisfaisante, des tests de stabilité dimensionnelle, de résistance à la dégradation biologique et des tests de résistance mécanique seront effectués\*. L'objectif final du projet serait d'étudier le transfert du traitement à l'échelle industrielle et l'élargissement à d'autres essences. Enfin, l'aptitude des *NIPU* à entrer dans des formulations d'adhésifs ou de finitions pour le bois est une piste à envisager pendant le projet.

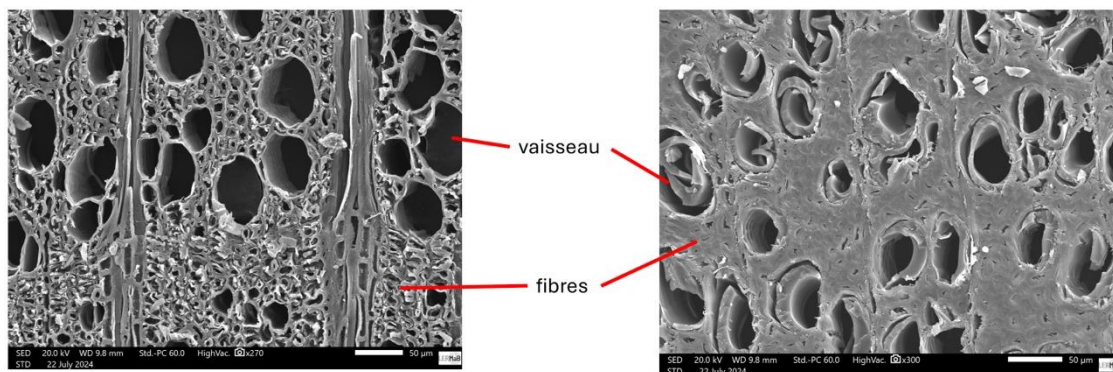


Fig.5 : Observation en coupe transversale des éprouvettes de bois au microscope électronique à balayage: à gauche, bois de hêtre natif (grossissement x270) ; à droite, bois de hêtre modifié avec le traitement NIPU+GDE après une semaine de lessivage (grossissement x300)

\*n.b. : des tests préliminaires de résistance à la dégradation biologique ont déjà été réalisés, la présence de *NIPU* dans le bois semble apporter une protection contre les champignons de pourriture, comme l'avaient observé Dumarçay et al (2015).

## Références

Chabert A J, Fredon E, Rémond R (2022) Improving the stability of beech wood with polyester treatment based on malic acid. *Holzforschung*. Vol. 76, no 3, pp. 268-275.

Dumarçay S, Iaych K, Lemor A, Gérardin P (2015) Investigations on wood treatment by eco-friendly hydroxypolyurethanes. *International Wood Products Journal*. Vol. 6, no 1, pp. 31-35.

Hill C (2006) *Wood Modification - Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons.

Kurkowiak K, Emmerich L, Militz H (2022) Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols – status quo and future perspectives. *Wood Material Science & Engineering*. Vol. 17, no 6, pp. 1040-1054.

Rowell RM (2013) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Zelinka SL, Altgen M, Emmerich L, Guigo N, Keplinger T, Kymäläinen M, Thybring EE, Thygesen L G (2022) Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies. *Forests*. Vol. 13, no 7, p. 1004.

## Modulation des contraintes mécaniques subies par le cambium et conséquences sur la morphogenèse cellulaire

GOURICHON Lucie<sup>1</sup>, BADEL Éric<sup>1</sup>, CLAIR Bruno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont-Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>Université Montpellier, CNRS, LMGC, Montpellier, France

[lucie.gourichon@doctorant.uca.fr](mailto:lucie.gourichon@doctorant.uca.fr)

**Mots clés :** cambium, xylogénèse, confinement mécanique, biomécanique

### Contexte et objectifs

Le cambium, situé juste sous l'écorce, est le méristème secondaire responsable de la production de deux tissus essentiels aux arbres : le phloème (liber ou écorce interne) vers l'extérieur et le xylème (bois) vers l'intérieur (Groover 2016). L'activité cambiale, régie à la fois par le bagage génétique de l'arbre et ses conditions de croissance, définit l'organisation cellulaire du bois. Parce qu'ils déterminent à la fois la quantité et la qualité du bois produit, il est essentiel de mieux comprendre les processus fondamentaux du cambium. Bien que de nombreuses études aient cherché à établir un lien statistique entre les facteurs environnementaux et la croissance secondaire des arbres (Rathgeber et al. 2016, Buttò et al. 2021), peu s'intéressent aux mécanismes physiques qui régissent son fonctionnement (Lintilhac et Vesecky 1984). Cette thèse se propose de comprendre comment l'environnement mécanique local et spécifique du cambium, confiné entre le xylème rigide et l'écorce (incluant le phloème), peut jouer un rôle déterminant dans les processus de divisions et d'expansions cellulaires, rendus possible par l'action de la pression de turgescence.

### Matériel et méthode

L'enjeu principal de cette thèse est d'identifier et de caractériser l'évolution des processus de divisions et d'expansions cellulaires, lors de modifications de l'environnement mécanique local du cambium de jeunes tiges d'arbres. Les modèles étudiés sont le peuplier (*Populus tremula x alba*, clone INRAE 717-1B4), le tilleul (*Tilia platyphyllos*) et le sapin de Nordmann (*Abies nordmanniana*). La stratégie adoptée consiste à moduler expérimentalement les contraintes radiales et tangentielles exercées par l'écorce sur le cambium, en effectuant notamment des incisions de l'écorce, selon un protocole spécialement développé dans le cadre de cette thèse (Fig. 1 et 2). D'autres approches expérimentales incluent la réalisation d'annélations partielles de l'écorce, avec ou sans repositionnement, ainsi que l'application de forces de tension (Fig. 3) ou de compression radiale contrôlées sur certaines zones de l'écorce. L'effet de ces modulations sur l'organisation cellulaire sera ensuite étudié et quantifié. L'analyse portera en particulier sur les variations du nombre de divisions cellulaires et sur l'orientation des plans de division, à partir d'analyses d'images réalisées sur des coupes cytologiques.

### Perspectives

Après une première campagne expérimentale menée, sur peupliers et sapins, durant le printemps et l'été 2024, les premiers résultats issus de l'analyse des coupes cytologiques sont attendus pour la fin de l'année. Une seconde campagne expérimentale de plus grande ampleur sera menée en 2025.

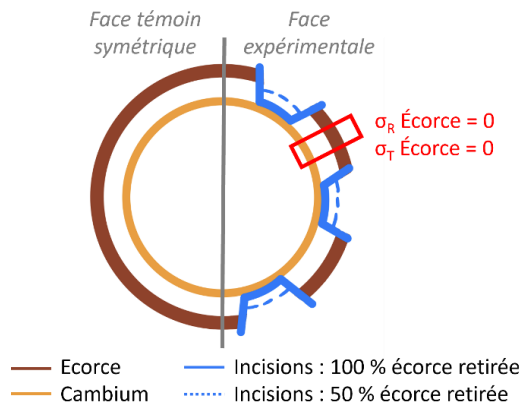


Fig. 1 : Schéma d'une coupe transversale de tige illustrant une expérimentation impliquant des incisions de l'écorce. L'objectif est de réduire, voire de supprimer, les contraintes mécaniques tangentielles ( $\sigma_T$ ) et radiales ( $\sigma_R$ ) qu'exerce l'écorce sur le cambium, afin d'observer si l'expansion radiale des cellules est inhibée par ces contraintes radiales.

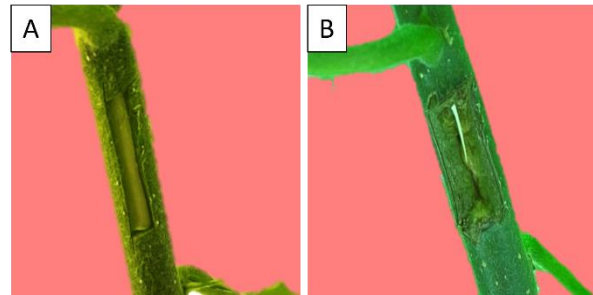


Fig. 2 : Photographies d'une tige de peuplier sur laquelle a été réalisée une incision de 2 mm de large. La totalité de l'écorce a été retirée dans la zone incisée. (A) Photographie prise juste après que l'incision ait été effectuée. (B) Photographie prise 30 jours après l'incision, montrant la formation d'un bourrelet cicatriciel au niveau de la blessure.

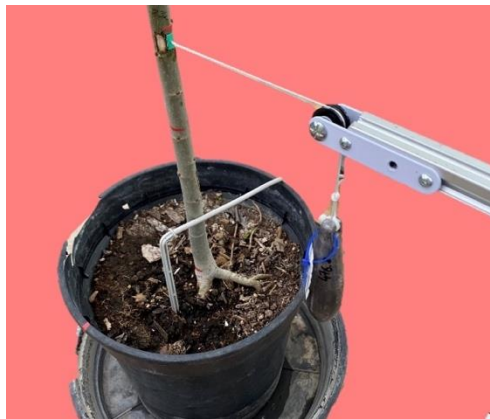


Fig. 3 : Photographie d'une expérimentation de tension radiale, appliquée sur une zone précise de l'écorce. Une pièce de plastique incurvée est collée à la surface de l'écorce et reliée à un poids, de masse connue.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le projet ANR CEMACam, dans lequel s'insère l'ensemble de ce travail.

## Références

- Buttò V, Rozenberg P, Deslauriers A, Rossi S, Morin H (2021) Environmental and developmental factors driving xylem anatomy and micro-density in black spruce. *New Phytologist* 230:957–971.
- Groover A (2016) Gravitropisms and reaction woods of forest trees – evolution, functions and mechanisms. *New Phytologist* 211:790–802.
- Lintilhac PM, Vesecky TB (1984) Stress-induced alignment of division plane in plant tissues grown in vitro. *Nature* 307:363–364.
- Rathgeber CBK, Cuny HE, Fonti P (2016) Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course. *Front Plant Sci* 7:734.



## **DynaTimberEyes – Développement de jumeaux numériques de bâtiments bois sur la base de mesures par caméras**

DION Jean-Luc<sup>1</sup>, CUMUNEL Gwendal<sup>2</sup>, CATTEROU Thomas<sup>3</sup>, LO FEUDO Stefania<sup>1</sup>,  
HAN Yunhyeok<sup>1</sup>, GOMEZ Dalmer<sup>2</sup>, KORDYLAS Layla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISAE SupMéca, Laboratoire Quartz, 3 rue Fernand Hainaut, Saint Ouen, France

<sup>2</sup>ENPC, Laboratoire Navier, 8 avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne, France

<sup>3</sup>Institut technique FCBA, Pôle IB&C, Allée du Boutaut, Bordeaux, France

thomas.catterou@fcba.fr

**Mots clefs :** Construction bois, Jumeau numérique, assemblages, métrologie, intelligence artificielle

### **Contexte et méthodologie**

Les bâtiments bois moyenne et grande hauteur sont de plus en plus courants, notamment en France. Ces bâtiments étant relativement récents dans le paysage urbain, des questions se posent quant à leurs réelles caractéristiques une fois construits et sur leur évolution dans le temps. Le projet DynaTimberEyes porte sur la mise en place d'une méthode de mesure des vibrations de bâtiments par caméra, dans le but de créer des jumeaux numériques pour le suivi des bâtiments. Des mesures indirectes des performances des bâtiments pourront être réalisées sur la base d'une méthode non invasive depuis l'extérieur du bâtiment. Pour la réalisation de cet objectif, trois études distinctes mais complémentaires sont nécessaires :

- Développement d'une méthode de métrologie par caméra capable de mesurer des mouvements infimes d'un bâtiment à grande distance.
- Définition de modèle simple mais réaliste pour appréhender le comportement dynamique d'un bâtiment bois.
- Implémentation d'algorithmes d'assimilation de données pour créer le jumeau numérique sur la base des mesures collectées par caméra.

La méthodologie proposée est rendue possible par la relative souplesse des bâtiments à dominante bois : les déplacements dus aux vents ou aux vibrations sont donc plus facilement perceptibles à la caméra. Néanmoins les structures bois ont un comportement non-linéaire, notamment dû aux assemblages, qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les modèles. Le projet est en cours et livrera ses résultats finaux en décembre 2025.

### **Métrologie par caméra**

La métrologie par caméra pour un bâtiment de grande dimension est un défi scientifique important. La précision de la méthode doit être extrêmement importante pour être capable de mesurer des petits déplacements.

**Synchronisation :** Plusieurs caméras synchronisées entre elles doivent être utilisées pour mesurer des déplacements en trois dimensions. Pour cela, un panneau lumineux puissant est utilisé et envoie un signal pulsé désynchronisé par rapport à la fréquence d'échantillonnage des caméras et qui contient l'information de temps (Han et al 2024). Il est ainsi possible de synchroniser les caméras avec une précision inférieure à la milliseconde.

**Distorsion :** Une image prise par une caméra est déformée par l'objectif, notamment au niveau de ces bords (l'effet « fish eye »). Pour corriger cette distorsion, la méthode de Zhang (2000)

est utilisée, avec une adaptation compte tenu de la dimension des objets d'étude. Le damier est remplacé par une « harpe » (voir Fig. 1a). Avant la réalisation des essais, plusieurs images sont prises pour définir la matrice de distorsion, en partant de l'hypothèse que les fils de la « harpe » sont rectilignes (Fig. 1b). Les images seront ensuite transformées en appliquant la distorsion inverse (Fig. 1c)

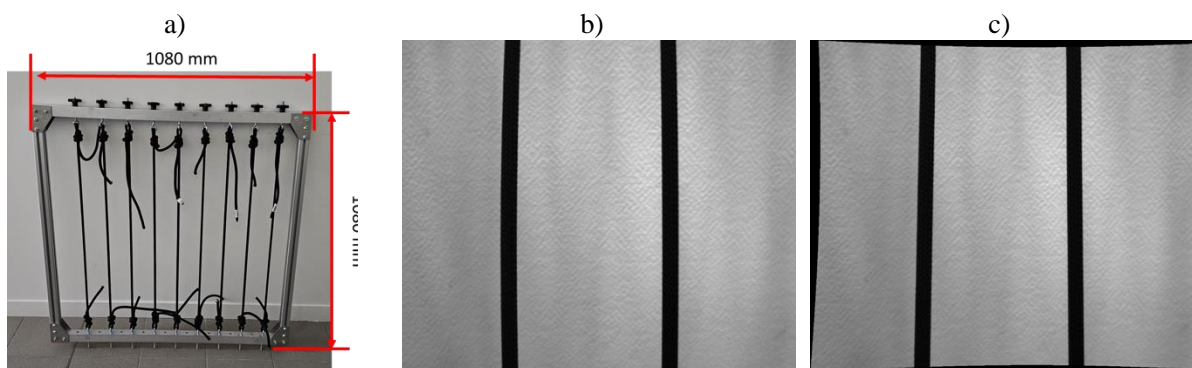


Fig. 1 : (a) Harpe de calibration, (b) Image déformée, (c) Image après transformation.

**Bruit :** La prise de mesure en extérieur induit des mouvements de la caméra à cause du vent, de la circulation etc... Compte tenu de la distance à laquelle sont prises les mesures, le moindre mouvement de la caméra occasionne des erreurs importantes. Deux méthodes de correction sont employées suivant la configuration de l'essai : soit il est possible d'identifier un « point fixe » dans le champ de la caméra dont le déplacement sera retranché du champ de déplacement mesuré, soit un accéléromètre placé sur la caméra permettra de prendre en compte ces bruits.

**Point de mesure :** Sur un bâtiment, il n'est pas possible de placer des cibles pour aller repérer des points de mesure. Un algorithme a été développé pour identifier des régions d'intérêt (ROI) reconnaissable en se basant sur les arêtes du bâtiment, avec un critère particulier pour établir la similarité entre les ROI entre deux images successives (Han et al 2024).

**Validation :** La méthodologie a été employée pour mesurer les vibrations d'une grue située à environ 50m du point de prise de vue. Un accéléromètre a pu être positionné en un point de la grue pour valider les valeurs d'accélération mesurées. La comparaison entre la méthode vidéo et l'accéléromètre est donnée en Fig. 2.

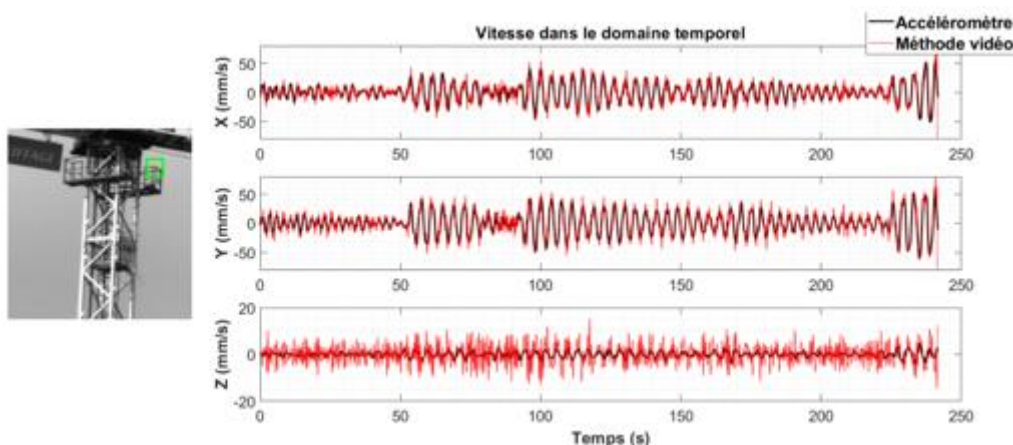


Fig. 2 : Validation de la mesure de déplacement 3D par vidéo avec un accéléromètre 3 axes (Han et al 2024)

La méthodologie fonctionne tant que le niveau de déplacement est suffisant ( $\sim 100\mu m$ ): lors des essais, le déplacement en z était trop faible pour être mesuré avec précision. Les mesures ont

permis de réaliser une analyse modale en champ complet de la structure avec une précision de moins de 1% par rapport aux mesures par accéléromètres.

**Modé (Valente 2024).** Il s'agissait de s'assurer que les mesures dynamiques établies avec les caméras soient semblables aux essais cycliques « lents » réalisés en laboratoire. La raideur et l'énergie dissipée par les connecteurs ne sont pas significativement dépendante de la vitesse pour des vitesses de sollicitation allant de 2mm/min (comme préconisé dans l'EN12512 (AFNOR 2002)) lisation de la structure et des assemblages

Une des difficultés du projet est de définir des modèles simples mais réalistes de la structure et des connecteurs pour alimenter le jumeau numérique. Hors cas accidentel, les éléments poutres ou plaques se comportent de façon pseudo-linéaire contrairement aux connecteurs. Dans les bâtiments bois moyenne et grande hauteur, les assemblages sont le plus souvent réalisés avec des organes métalliques : broches, boulons ou pointes. Les caractéristiques statiques peuvent être calculées sur la base de l'Eurocode 5 (AFNOR 2005), même si la formule permettant de calculer la raideur des connecteurs est souvent remise en cause (Rahim 2019, Iraola et al 2021, Tao et al 2021). Le comportement cyclique est quant à lui très complexe et les lois de comportement les plus courantes (Foschi et Bonac 1977, Rinaldin et al 2013, Humbert et al 2014) nécessitent trop de paramètres pour être implémentées dans un jumeau numérique.

Un modèle rhéologique de type Dahl permet de reproduire le comportement du connecteur pour de faibles niveaux d'efforts. Des études de sensibilité ont été réalisées pour déterminer l'effet du jeu et des autres paramètres sur la raideur et l'énergie dissipée par le connecteur. L'étude a permis d'améliorer la compréhension sur les phénomènes influant sur la propriété des connecteurs pour bien les prendre en compte dans les modèles du jumeau numérique.

Des essais ont aussi été réalisés pour analyser l'effet de la vitesse de sollicitation sur les propriétés hystérétiques pour des connecteurs de type broche ou boulons jusqu'à 600mm/min.

### Assimilation de données – jumeau numérique

La conception d'un jumeau numérique nécessite la mise en place de méthode d'assimilation de donnée efficace utilisant l'intelligence artificielle pour définir les paramètres du modèle à partir des données expérimentales récoltées. Le filtre de Kalman (Fig. 3) permet d'intégrer les observations expérimentales au modèle, avec un indice de confiance correspondant au gain (Kalman 1960, Särkkä 2013)

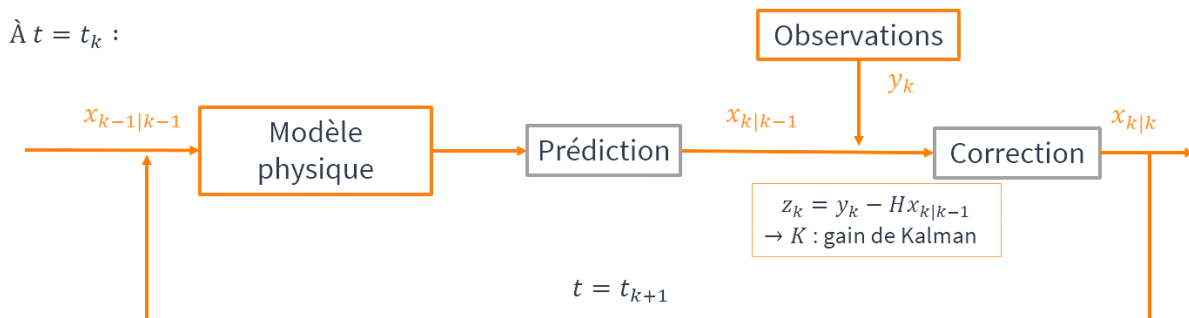


Fig. 3 : Principe de fonctionnement du filtre de Kalman

Un modèle physique de ressort linéaire associé en parallèle à un modèle de Dahl a été utilisé pour représenter une structure multi-étagé et qui prend en compte de la dissipation d'énergie par friction. Sur la base de l'état à l'instant précédent, une prédiction du comportement de la structure à l'instant  $t_k$  est réalisée. Cette prédiction est corrigée par les observations via le calcul d'un filtre de Kalman étendu adapté aux problèmes non-linéaires (Kordylas 2024).

## Conclusion et perspective

La méthodologie a été appliquée avec succès pour une maquette échelle réduite. Dans la suite du projet nous souhaitons valider la méthode pour une maquette grande échelle sur table sismique et sur des bâtiments réels. Si la méthode est fonctionnelle, elle permettra d'identifier simplement l'évolution des paramètres de raideurs et de masse d'un bâtiment, ce qui peut permettre de valider la construction d'un ouvrage ou de suivre la durabilité d'une structure dans le temps.

## Références

- AFNOR (2002) EN 12512 - Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners.
- Foschi RO, Bonac T (1977) Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails. Wood Science.
- Han Y, Cumunel G, Lo Feudo S, Renaud F (2024) Analyse Modale Opérationnelle par Caméras d'une Structure de Grande Hauteur. In . <https://hal.science/hal-04610891>.
- Han Y, Lo Feudo S, Cumunel G, Renaud F (2024) Sub-frame timestamping of a camera network using a coded light signal. Measurement 236 :115046. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115046>.
- Humbert J, Lee SJ, Park JS, Park MJ. (2014) Improving the Moment Resistance of a Concealed Timber Post Base Joint. In Materials and Joints in Timber Structures, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_2).
- Iraola B, Cabrero JM, Basterrechea-Arévalo M, Gracia J (2021) A Geometrically Defined Stiffness Contact for Finite Element Models of Wood Joints . Engineering Structures 235:112062. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112062>.
- Kalman RE (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering 82: 35 45.
- Kordylas L (2024) Détection d'évolution de paramètre dynamique dans une structure à l'aide de méthode d'assimilation de données . In 16ème Colloque National en Calcul de Structures. Giens, <https://hal.science/hal-04610916>.
- Rahim NL (2019) Stiffness of Bolted Timber Connection. Thesis, ResearchSpace@Auckland. <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/46384>.
- Rinaldin G, Amadio C, Fragiaco M (2013) A Component Approach for the Hysteretic Behaviour of Connections in Cross-Laminated Wooden Structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 42 (13): 2023 42. <https://doi.org/10.1002/eqe.2310>.
- Särkkä S (2013) Extended and unscented Kalman filtering. In Bayesian Filtering and Smoothing, 64 95. Institute of Mathematical Statistics Textbooks. Cambridge University Press.
- Tao HT, Yang HF, Ju GY, Shi BK (2021) Elastic Stiffness of Timber Joints with Dowel-Type Fasteners and Slotted-in Steel Plate Based on the Theory of Beam on Elastic Foundation. Construction and Building Materials 294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123569>.
- Valente C (2024) Analyse de l'influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement des assemblages bois-métal. Institut technologique FCBA.
- Zhang Z (2000) A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (11): 1330 34. <https://doi.org/10.1109/34.888718>.

## Non-destructive measurement of orthotropic elastic properties of wood samples by their modal impulse response

Al FAY Alaa<sup>1</sup>, ARNOULD Olivier<sup>1</sup>, CORN Stéphane<sup>2</sup>,  
LANGBOUR Patrick<sup>3</sup>, JULLIEN Delphine<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Équipe Bois, LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

<sup>2</sup> Équipe DMS, LMGC, Univ Montpellier, IMT Mines Alès, CNRS, Alès, France

<sup>3</sup> UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier, France

[alaa.al-fay@umontpellier.fr](mailto:alaa.al-fay@umontpellier.fr)

**Key words:** wood; vibration; modal analysis; elastic constants; FEA; non-destructive testing

### Context and objectives

Wood represents a major class of versatile materials in mechanics, comparable to metals on various criteria such as annual world production tonnage. Its density is 5 to 10 times lower than that of metals, due to its cellular structure, whose walls are essentially made up of layers of long-fibre nanocomposites. This makes wood highly efficient for applications, particularly for those requiring a high performance-to-mass ratio. However, contrary to the longitudinal elastic modulus ( $E_L$ ), the knowledge of the transverse ( $E_R$  and  $E_T$ ) and shear ( $G_{RT}$ ,  $G_{LT}$  and  $G_{LR}$ ) elastic properties of this orthotropic, heterogeneous, hygroscopic and variable material are still limited due to a lack of rapid and efficient characterization tools and methods. Currently, the existing technical data in databases are incomplete since, generally, only the longitudinal elastic modulus ( $E_L$ ) is available, which is (more or less) satisfactory for long civil engineering beams, whereas the other elastic properties are essential for high-end and high-performance structural applications, such as parts for power generation, cars, planes, etc (Castanié et al 2024).

The aims of this study are: to quickly measure as much properties as possible of a single wood sample (to eliminate the effect of variability between samples) using the modal analysis of its vibrational impulse response (Al Fay et al 2023); to enrich the CIRAD wood database with orthotropic elastic constants on a wide range of wood species; and to analyse the correlations between macroscopic elastic behaviour and ultrastructural parameters, including density and microfibril angle (MFA), in order to improve prediction models.

### Material and methods

#### *Wood samples*

Up to now, twenty-seven parallelepiped samples of wood from nineteen different species were tested. All samples had fixed dimensions of around  $130 \times 60 \times 10$  mm<sup>3</sup>, which cannot be modified as samples are valuable. They were taken from CIRAD "xylotheque" (Langbour et al 2019), a comprehensive library containing over 34.000 samples from 8.400 species from all around the world. These samples had different growth ring orientations on their transverse cross-section: some were quarter-sawn, with rings mainly parallel to the thickness or inclined at different angles, while others were flat-sawn, with rings mainly parallel to the width or also inclined at various angles. All samples had a straight grain, mainly oriented along the sample's length. It is important to note that there were samples of the same species with different orientations of growth rings. All measurements were performed under constant climatic conditions of 20°C and 40% RH.

### *Experimental set-up*

The method used was a fast and non-destructive test by impulse modal analysis. Samples were mounted on soft elastic supports to achieve free-free-free-free boundary conditions and excited using either a small hammer or a steel ball. Vibrations were recorded by a high-sensitivity microphone (PCB - 130F20) and signals acquired with a digital oscilloscope (TDS 3032). Time-domain response data were processed using Fast Fourier Transform to obtain frequency-domain response. Finally, modal parameters were identified based on the least square complex frequency (LSCF) method (Peeters et al 2004) using MODAN, which is an integrated structural dynamic identification software developed by Femto-ST Institute (Besançon, France).

### *Test configurations*

After trying three measurement configurations on several samples (flat, on edge and longitudinal orientations), only one configuration (flat) was finally retained for each sample. In this configuration, four different locations were considered to position the microphone and the impact. This was done to achieve two goals: exhaustively measure resonance frequencies, to ensure that no mode was missed within the considered frequency range, and accurately and rapidly associate each measured resonance frequency with its corresponding mode, based on the positions of impact and microphone relative to computed vibration nodes.

### *Identification of elastic constants from frequencies*

Compliance elastic matrix C coefficients were initialized using Guitard and El Amri's (1987) empirical relationships based on sample density (only). As direct calculation, modal shapes and frequencies were computed using Cast3m FEA software<sup>1</sup>, considering sample dimensions, wood's density, orthotropy, ring orientation and curvature (and even the grain angle) in a cylindrical coordinate system. A picture of each transverse cross section of the sample is used to determine the relative position of sample to the pith axis. Elastic constants were then optimized by minimizing squared differences between measured and computed frequencies, iteratively recalculated to achieve a given tolerance. The eigenmodes were tracked during the identification process by maximising the correlation function between the mode shapes computed at initialisation and those computed during the minimisation process.

### *Sensitivity and identifiability analysis*

Before identifying elastic constants, a sensitivity analysis of each mode to different elastic constants was conducted by varying their initial values by 1%, thus obtaining a sensitivity matrix. This analysis was crucial for determining which elastic constants can be identified with which mode(s), particularly focusing on the lowest frequency modes to save measurement time and accuracy. Indeed, as the spectral density increases with the frequency, high-ranking modes are more difficult to separate from one another, especially as their amplitude is low. An identifiability analysis is conducted using a so-called I-index (Barick et al 2020). This analysis was essential to quantify the reliability of the identified elastic constants using various mode combinations. The I-index, based on the sensitivity function, assesses the conditioning and uniqueness of the solution in the inverse problem. A low I-index ensures robust and accurate identification of elastic constants with a unique solution (Barick et al 2020). To study the minimum modes required for identifying elastic constants, a numerical perfect wood sample with flat growth rings assumed parallel to the width (i.e., anatomical direction T is parallel to

---

<sup>1</sup> <http://www-cast3m.cea.fr/>

the width), with no grain angle, of "xylotheque" dimensions, a density of 700 kg/m<sup>3</sup> and having elastic constants equal to those predicted by Guitard and El Amri's model (1987) were used. Its 'measured' natural frequencies were computed and the aim was to see whether the inverse identification algorithm could recover the correct elastic constants even if their initial values were multiplied by a coefficient of between 1.1 and 1.3. A sensitivity matrix was calculated, and two approaches were tested. The first one is a two-step approach: one by first identifying the three most sensitive constants ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $G_{LR}$ ) and then reidentifying these three constants and the two less sensitive ones ( $G_{RT}$ ,  $G_{LT}$ ), using the updated compliance matrix  $C$  from the first step. The second one is a one-step approach with a simultaneous identification of the five elastic constants from the initial compliance matrix  $C$ .

## Results and discussion

### *Minimum modes required for identifying elastic constants of a perfect wood sample*

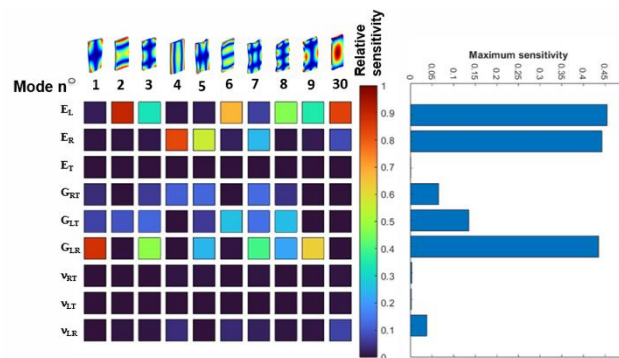


Fig. 1: (left) relative sensitivity  $\frac{\Delta f_m / f_m}{\Delta X_i / X_i}$  of the computed mode of rank  $n^\circ m$  to the elastic coefficients  $X_i$  (e.g.,  $X_i = E_i$  or  $G_{ij}$  or  $\nu_{ij}$ ), normalised by the sum of the sensitivity for a given mode, with the maximum sensitivity of the modes to each elastic constant (right). The colours of the mode shapes above the rank of modes indicate the normalised intensity of the out-of-plane displacements, with blue corresponding to the vibration nodes.

The relative sensitivity matrix of each mode, which is usually measurable but given here for the numerical perfect wood sample, is given in Figure 1. It shows that the modes are mainly sensitive to  $E_L$ ,  $E_R$  and  $G_{LR}$  and, to a lesser extent, to  $G_{LT}$ ,  $G_{RT}$  and a little to  $\nu_{LR}$ , the latter not being taken into account in the identification. Calculating the I-index, using this sensitivity matrix, shows that a good combination of five modes (i.e., modes  $n^\circ 1, 2, 4, 6$  and  $7$ ) was sufficient to robustly identify the five elastic constants in our case. In addition, by comparing one-step and the two-step identification methods shows that a one-step process achieved similar accuracy (relative error  $< 1\%$  for four elastic constants and  $1.14\%$  for  $G_{LT}$ , the constant with the lowest sensitivities), indicating it is both sufficient and time-saving compared to the two-step.

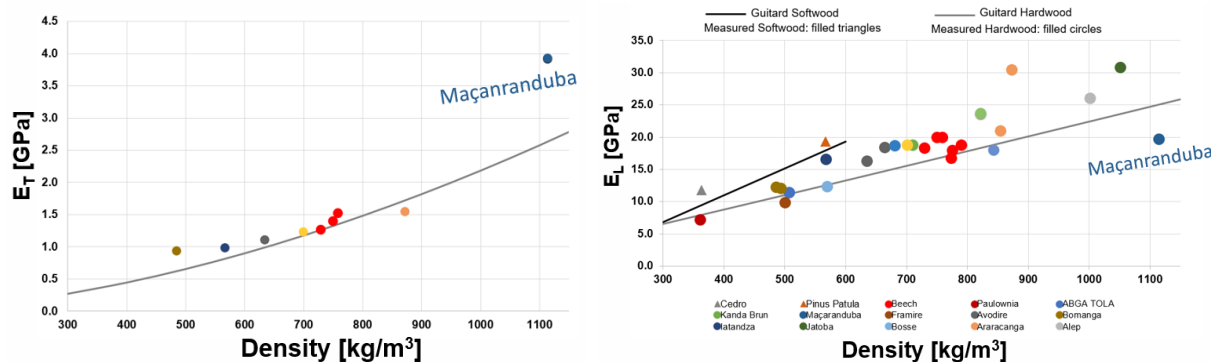


Fig. 2: Measured samples: hardwood (circles), softwood (triangles).  
Guitard and El Amri's regression laws: softwood (black), hardwood (grey).

### *Identification of elastic constants of real wood samples across a wide density range*

The identification process described above was applied to various wood samples (hardwood and softwood) with a wide range of densities, from 360 to 1115  $\text{kg/m}^3$ . The elastic constants identified are generally close to those given by the Guitard's models, as shown in Figure 2, except for densities over 900  $\text{kg/m}^3$ , where significant deviations were observed. We expect this discrepancy arises because the Guitard's models have been adjusted mainly on wood with low or intermediate density. Moreover, they only consider the density as a parameter and no other anatomical properties. For example, Maçaranduba (*Manilkara bidentata*) flat-sawn sample, exhibited lower longitudinal modulus  $E_L$  and higher transverse modulus  $E_T$  compared to the predictions from Guitard's models, potentially due to a high MFA.

### **Conclusion and perspectives**

This study used modal impulse response analysis to efficiently identify some orthotropic elastic properties of wood samples, focusing on key modes by using identifiability criteria based on a sensitivity analysis. The I-index showed that not all modes are needed to determine the elastic constants, and a one-step method is sufficiently accurate. While the results validated the method over a wide range of wood densities, discrepancies are observed at high densities or could be linked to anatomical parameters like a high microfibril angle. Future and ongoing work will extend the study to other wood samples, compare results with ultrasound time-of-flight (Toulgoat et al 2024) and quasi-static testing (torsion and bending) methods, measure the average MFA of all samples using XRD measurements and investigate the relationship between the macroscopic elastic properties of woods and anatomical parameters (mainly density and microfibril angle) in order to improve prediction models.

### **Acknowledgements**

Labex NUMEV and the I2S doctoral school of the University of Montpellier are co-funding the PhD thesis of this project.

### **References**

Al Fay A, Jullien D, Corn S, Arnould O, Langbour P (2023) Non-destructive measurement of orthotropic elastic properties of wood samples by their modal impulse response. In: 12<sup>èmes</sup> Journées du GDR Sciences du Bois, Limoges.

Barick M, Gaillard Y, Lejeune A, Amiot F, Richard F (2020) On the uniqueness of intrinsic viscoelastic properties of materials extracted from nanoindentation using FEMU. International Journal of Solids and Structures, 202: 929-946.



Castanié B, Peignon A, Marc C, Eyma F, Cantarel A, Serra J, Curti R, Hadiji H, Denaud L, Girardon S, Marcon B (2024) Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review, *Composite Structures*, 329, 117790 (45 p.).

Guitard D, El Amri F (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des Sciences Forestières*, 44(3): 335–358.

Langbour P, Paradis S, Thibaut B (2019) Description of the Cirad wood collection in Montpellier, France, representing eight thousand identified species. *Bois et Forêts des Tropiques*, 339: 7-16. Website: <https://ur-biwooeb.cirad.fr/plateformes-equipements/bois-materiau/xylotheque> (last access: September 2024).

Peeters B, Auweraer H, Guillaume P, Leuridan J (2004) The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation? *Shock and Vibration*, 11(3, 4): 395-409.

Toulgoat K, Sapey G, Laux D, Augereau F, Rosenkrantz E, Arnould O (2024) Optimisation des méthodes ultrasonores et vibratoires pour la caractérisation viscoélastique complète d'échantillons de bois. In: 13<sup>èmes</sup> Journées du GDR Sciences du Bois, Nantes.

## Renewable energy evaluation of recycled wood through thermochemical conversion pathway and artificial intelligence optimization: physicochemical, thermodegradation and flammability behaviours

ANIZA Ria<sup>1,2,3,4</sup>, PETRISSANS Anelie<sup>1</sup>, PETRISSANS Mathieu<sup>1</sup>, CHEN Wei-Hsin<sup>4,5,6</sup>, HERRERA Christian J.A.<sup>7</sup>, QUIRINO Rafael<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F88000, Epinal, France

<sup>2</sup>Research Center for Energy Conversion and Conservation, National Research and Innovation Agency, Tangerang Selatan 15314, Indonesia

<sup>3</sup>International Doctoral Degree Program in Energy Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan

<sup>4</sup>Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan

<sup>5</sup>Research Center for Smart Sustainable Circular Economy, Tunghai University, Taichung 407, Taiwan

<sup>6</sup>Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology, Taichung 411, Taiwan

<sup>7</sup>Chemistry Department, Georgia Southern University, Statesboro, GA-30460, USA  
[ria.aniza@univ-lorraine.fr](mailto:ria.aniza@univ-lorraine.fr) or [riaaniza@gmail.com](mailto:riaaniza@gmail.com)

**Keywords:** Wood valorization; thermodegradation; bioenergy-bioexergy; combustibility indexes; Taguchi method; artificial neural network model

### Context and objectives

Wood waste or byproducts have attracted international attention as a second-generation biofuel. The potential for renewable energy as a substitute for fossil fuels is regarded as one of the solutions to environmental and human health challenges created by fossil fuel combustion (Lin et al 2022). Wood waste is a possible feedstock for sustainable energy production (particularly bioenergy) obtained from lignocellulosic-based biomass (Petrisans et al. 2022). Hardwood species are composed of 38-51% cellulose, 17-38% hemicelluloses, 2-31% lignin, and 3% extractives. In contrast, softwood species consist of 2-3.5% extractives, 27-32% lignin, 22-40% hemicelluloses, and 33-42% cellulose. As a feasible technique for converting wood waste biomass into useful products like heat - combustion, one of the thermochemical processes (Fig. 1) is proposed. Moreover, several critical elements influence combustion, including temperature, heating rate, heating time, and fuel type. High CO emissions and the production of smoke or particulate matter (PM) might result from poorly managed combustion parameters. In this case, it is crucial to prevent incomplete combustion by evaluating the combustion parameter.

One useful method for assessing renewable energy in the circular bioeconomy concept from a biomass-based source is the specific chemical bioexergy (SCB) analysis type. The goal of SCB is to determine the energy of the biofuel based on the biomass' chemical composition (Chen and Aniza 2023). When compared to analyses based on lower heating values (LHV) or higher heating values (HHV), SCB offers a more thorough and in-depth evaluation that accurately captures the energy contained in biomass material. According to earlier research, exergy in biomass can be found by calculating the proximate analysis (ash content) and elemental analysis (C, H, O, N, and S elements) (Song et al 2013). In circular bioeconomy systems, thermodynamic inefficiencies (exergy destructions and losses) can be located, quantified, and

caused by applying the SCB evaluation, which is based on the second law of thermodynamics on wood valorization. In order to achieve the future Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (SDGs) for cheap and clean energy (SDG 7), responsible consumption and production (SDG 12), and climate action (SDG 13), recycling woody debris into biofuel is thought to be an effective strategy. Furthermore, the objective of this study is closely associated with the ninth goal of industry, infrastructure, and innovation (SDG9) and the zero-waste principle for controlling waste production. By improving the scalability, affordability and dependability of renewable energy production and development, AI is employed to speed up the pace of the shift to a sustainable energy future.

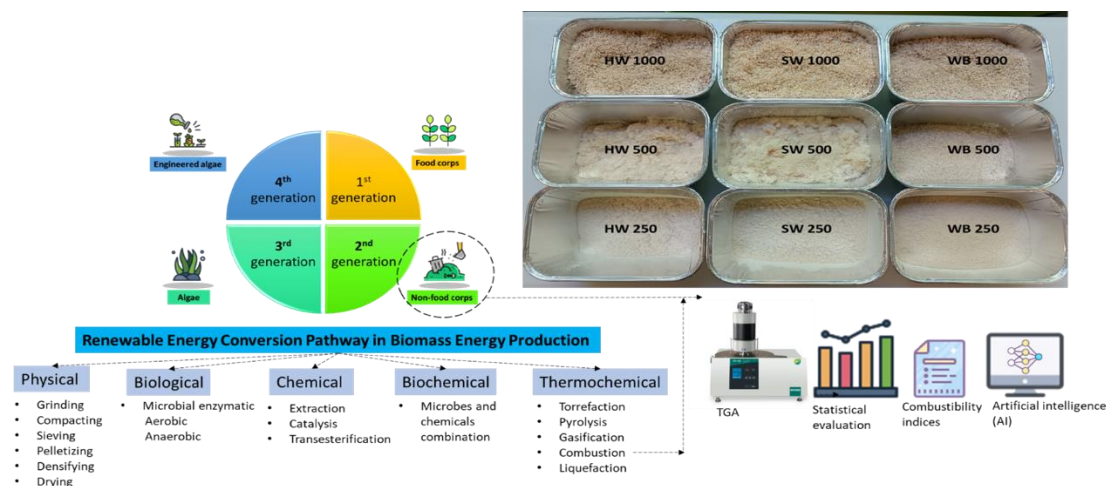


Fig. 1: Framework of renewable energy production through wood waste

To the best of the authors' knowledge, no study has, however, thoroughly examined the combustion of wood waste in terms of bioenergy (calorific value; HHV) and bioexergy (specific chemical biomass exergy; SCB), taking into account combustibility indexes and the application of AI. Additionally, little is known about the technology and development of this process. Consequently, the goal of this work is to give thorough TGA bioenergy and bioexergy evaluations of wood waste (Fig. 1). Physicochemical investigations characterize the qualities of wood waste feedstock. To ascertain the optimal amounts of desirable parameters and identify the influential aspects impacting performance, artificial neural networks (ANN) and statistical assessment (signal-to-noise ratio and analysis of variance) are employed in conjunction with AI analysis. Moreover, it provides industry experts and researchers with similar interests with useful information and a better understanding, especially for the development of renewable bioenergy production and industrial scale-up employing bioenergy woody-based products.

## Material and methods

For use in the timber industries, the nearby forest's woods (hardwood: beech *Fagus sylvatica*, and softwood: fir *Abies alba*) were collected. Hardwood (HW), softwood (SW), and wood blend (WB, a 50-50 weight percentage combination of HW and SW) were the three waste categories into which the samples were divided. The WB combination followed the recommendation of Forest Stewardship Council (FSC) in the European Union (EU) region for solid biofuel with a 50-50 weight percentage mixture of HW and SW.

### Sample preparation and design of experiment

The samples underwent a 24-hour sun-drying process outside. In order to achieve a consistent particle size across three sizes—250, 500, and 1000  $\mu\text{m}$ —the dry samples were separately ground and sieved (Aniza et al. 2022). Furthermore, three distinct levels are assigned to each

of these factors: (1) hardwood, softwood, and wood blend (HW, SW, and WB); (2) 250, 500, and 1000  $\mu\text{m}$ ; and (3) 10, 15, and 20  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Nine runs (L9) of experiments comprised the design matrix with the three components and three design levels.

#### *Physicochemical and statistical evaluations*

The samples were examined for their proximate analysis (PA), elemental analysis (EA), calorific values (HHV) and FTIR. The thermodegradation behavior was identified by using the TGA method. The SCB calculation was carried out as follows (Song et al 2013):

$$SCB = 36.3439 C + 107.5633 H - 8.6308 O + 0.4147 N + 19.0798 S - 21.100 A \quad (\text{Eq.1})$$

where C, H, O, N, S, and A denoted carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and ash, respectively. The TG apparatus NETZSCH – STA 449 F3 Jupiter was used to directly burn wood waste. A ceramic crucible with a capacity of approximately 90  $\mu\text{L}$  was filled with 5 mg of the sample. For example, the  $\text{N}_2$  gas was purged into the system for five minutes at a rate of 100  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Subsequently, three heating rates were applied to the sample: 10, 15, and 20  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , from room temperature to 800  $^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2). The amount of solid that remained in the crucible was called the ash content. The PA, EA, HHV, and direct combustion experiments in this study were all carried out in duplicate. With a maximum risk of 5%, the data's repeatability was maintained at >95%.

#### *Flammability indexes and artificial intelligence analysis*

The ignition index  $D_{ig}$  ( $\%\cdot\text{min}^{-3}$ ) was calculated according to López-González et al. (2017) as follows:

$$D_{ig} = \frac{(dw/dt)_{max}}{(t_{max}\cdot t_{ig})} \quad (\text{Eq. 2})$$

where  $t_{ig}$  was the ignition time,  $t_{max}$  is the time corresponding to the maximum combustion rate  $(dw/dt)_{max}$  and  $(dw/dt)_{max}$  ( $\%\cdot\text{min}^{-1}$ ) is the maximum combustion rate (DTG curve at the highest peak - DTGmax). By showing the fuels' propensity to absorb heat and start burning, the ignition index suggested that collected fine fuels may ignite in the presence of a heat source. Additionally, the artificial neural network (ANN) analysis was utilized in this work to forecast the SCB and HHV values. In order to ascertain the impact of the HHV and SCB as the output data, the parameters were created as input data. The duplicate Taguchi parameters (waste type, particle size, and heating rate—9 runs): 18 data, EA (C–H–O): 18 data (HW, SW, and WB), and PA (M, VM, FC, Ash): 24 data (HW, SW, and WB) are among the ten parameters that were utilized to feed the input data. Megaputer Polyanalyst 6.5 was the program used to create the ANN model.

## **Results and discussion**

### *Characterization analysis*

HW, SW, and WB moisture contents for proximate analysis are 5.94, 4.00, and 3.00 wt%, respectively (Tab. 1). Biofuel's low moisture content is advantageous since it may boost energy density and enhance combustion efficiency. All samples, including HW (84.05 wt%), SW (83.50 wt%), and WB (83.67 wt%), have VM values higher than 80wt%. A high VM in the sample means that there is a good chance that solid chemical molecules, such as cellulose, lignin, and hemicelluloses, will devolatilize into gaseous chemical compounds. As a result, the word S and the ash content in Eq. (1) about the SCB computation may be removed. Tab. 1 indicates that, out of all samples (WB – HHV: 19.32  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , SCB: 18.52  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  and HW – HHV: 19.03  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  and SCB: 18.20  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), SW had the highest HHV and SCB values

(HHV: 18.84 MJ·kg<sup>-1</sup>, SCB: 19.65 MJ·kg<sup>-1</sup>). The reason for these phenomena is that the C-element content of the SW is larger (C: 47.26 wt%) than that of WB (C: 46.58 wt%) or HW (C: 45.99 wt%). The amount of H-element in the samples is found to be extremely low (approximately <6 wt%), even though it has the largest coefficient value in the SCB determination (Eq. 1). As a result, the HHV and SCB values of wood waste samples are not substantially affected by the H-element.

Tab. 1. Properties of raw wood waste: PA, EA, HHV, and SCB

<b>Biomass properties</b>	<b>HW</b>	<b>SW</b>	<b>WB</b>
<b>Proximate (wt%)</b>			
M	5.94	4.00	3.00
VM	84.05	83.50	83.67
FC	10.00	12.50	13.32
Ash	<0.01	<0.01	0.01
<b>Elemental (wt%)</b>			
C	45.99	47.26	46.58
H	5.77	5.86	5.86
O	45.05	44.36	45.32
N	< 0.05	< 0.05	< 0.05
S	< 0.05	< 0.05	< 0.05
<b>Bioenergy-HHV and bioenergy-SCB (MJ·kg<sup>-1</sup>)</b>			
HHV	18.20	18.84	18.52
SCB	19.03	19.65	19.32
SCB/HHV ratio	1.046	1.043	1.043

The thermodegradation behavior of wood waste is evaluated through the TGA method (Fig. 2). The first peak relates to the thermodegradation of lignocellulosic chemical complexes with light molecular weight (hemicelluloses) and some lignin. Some previous experiments showed that the hemicelluloses from lignocellulosic biomass mostly degraded, not surpassing 275 °C (Escalante et al. 2022). The second peak has the highest peak among the others. This peak (300-400 °C) relates to the thermodegradation of mostly cellulose and some lignin. Simultaneously, the third peak appears at about 450-550 °C, demonstrating the thermodegradation from a slight cellulose and the rest of the lignin.

#### *Flammability index and chemical functional group*

A high ignition index (Fig. 3) at the same heating rate means that the material will ignite at lower temperatures. This characteristic means that the material requires less energy or heat than materials with lower ignition indices to start the ignition process. Furthermore, the criterion of self-ignition is divided into four classes: non-reactive (Dig 0.00-0.02), low-reactive (Dig 0.021-0.03), reactive (Dig 0.031-0.05), and high-reactive (>0.051). The results indicate that waste wood is classified into three regions non-, low-, and reactive. The highly reactive biofuel (>0.051) is not suggested due to safety concerns (fire, explosion), handling challenges (transporting, storing, packaging), and environmental impacts (air pollution). In this regard, wood waste is considered as a decent biofuel feedstock. The functional group of chemical compounds has been identified by FTIR test. The 1<sup>st</sup> peak at 1,158.50 cm<sup>-1</sup> appears in a range of wavenumber about 1,120 – 1,160 cm<sup>-1</sup> corresponding to the C-O-C polysaccharide functional group. The C-O-C asymmetric stretching functional group of the 1<sup>st</sup> peak at 1,158.50 cm<sup>-1</sup> in the range of wavenumber about 1,120 – 1,160 cm<sup>-1</sup> is associated with the chemical compound in cellulose (Emmanuel et al. 2015) and the mannose group of hemicelluloses (Horikawa et al

2019). The mannan-type hemicellulose group (mannose) is a polysaccharide composed of six-carbon sugar glucose. Softwood mannanose can be found as the most abundant sugar compared to other polysaccharide groups. The asymmetric CH<sub>2</sub> stretching vibration is classified as methylene and methine groups in the 2<sup>nd</sup> peak. The CH<sub>2</sub> functional group in the 2<sup>nd</sup> peak is noticeable at 2,948.63 cm<sup>-1</sup> in the wave number of 2,850 – 2,950 cm<sup>-1</sup>, correlated to the two types of hemicelluloses (xylan and mannanose), cellulose, and lignin (Li et al 2018). Furthermore, the 3<sup>rd</sup> peak is acknowledged at 3,425.40 cm<sup>-1</sup> which is assigned to the OH molecules. The OH molecules stretching absorption bands are typically absorbed in about 3400 cm<sup>-1</sup> wave number (3,350 – 3,450 cm<sup>-1</sup>), associated with cellulose and hemicelluloses (Sharma et al 2024).

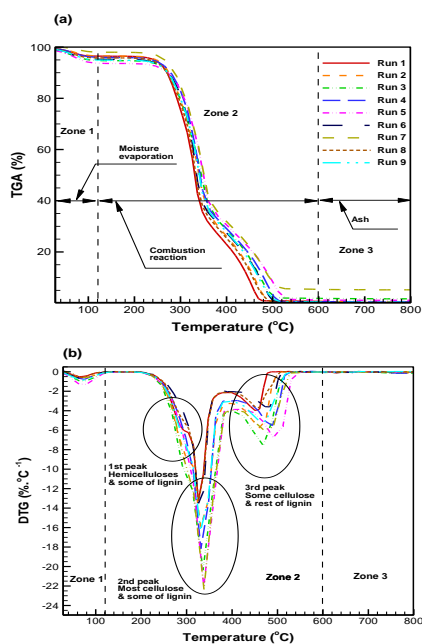


Fig. 2. Thermodegradation behavior of hardwood, softwood, and wood blends respected to (a) TGA and (b) DTG curvatures.

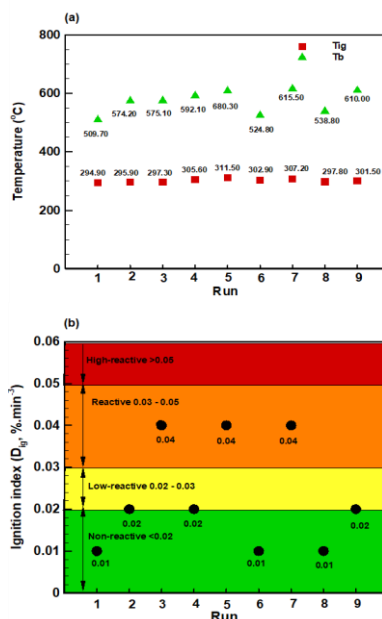


Fig. 3. Profile of (a) ignition and burnout temperature and (b) ignition index of wood waste.

### Prediction by ANN model

Among the configurations, the best result of the ANN model for HHV and SCB model predictions with the lowest standard deviation is obtained by utilizing a 1 HL with 5 N for HHV with the fit quality precisely  $R^2 = 1$ . In this regard, the wood waste type is the most influence factor in bioenergy analysis (HHV), followed by FC, O, C, H particle size, A, heating rate, VM and M. Likewise, the configuration of 1HL with 5N illustrates the best result prediction for the bioexergy analysis (SCB). The most influential parameters are wood waste type, followed by H, FC, C, O, A, particle size, heating rate, M, and VM.

### Conclusions

This study investigated the combustibility thermodegradation behavior of wood wastes (HW, SW, and WB) using the TGA method in conjunction with the Taguchi orthogonal, statistical analysis, combustibility indices, and AI model predictions. The physicochemical tests reveal that all wood waste feedstock is high in VM (>80 wt%), high in C and O, and low in ash, N, and S. The evaluation shows that the SCB is typically higher (about > 19 MJ·kg<sup>-1</sup>) than HHV (about 18 MJ·kg<sup>-1</sup>). The TGA/DTG curves obtained, using typical heating rates of 10, 15, and 20 °C·min<sup>-1</sup>, suggest there are 3 zones distinguished. The combustibility indexes indicate that wood waste has 4 classes of ignition index (non-reactive to high-reactive). The optimum run is

achieved with SW250 at 20 °C·min<sup>-1</sup> heating rate. The ANN model with 1HL–5N configuration successfully predicts the values of HHV and SCB with excellent fit-quality values ( $R^2=1$ ).

### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support under the program ANR-11-LABEX-0002-01 (Lab of Excellence ARBRE) in France, and the FACE Foundation, iCemiture (NSF-IRES 1952402), and Georgia Southern University. The authors also acknowledge the financial support of the National Science and Technology Council, Taiwan, R.O.C., under the contracts NSTC 112-2218-E-006-025- and NSTC 112-2218-E-002-052- for this research.

### References

Aniza R, Chen W-H, Yang F-C, Pugazhendh A, Singh, Y (2022) Integrating Taguchi method and artificial neural network for predicting and maximizing biofuel production via torrefaction and pyrolysis. *Bioresource Technology*, 343, 126140.

Chen W-H, Aniza, R (2023) Specific chemical bioexergy and microwave-assisted torrefaction optimization via statistical and artificial intelligence approaches. *Fuel*, 333:126524.

Emmanuel V, Odile B, Céline, R (2015) FTIR spectroscopy of woods: A new approach to study the weathering of the carving face of a sculpture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 1255-1259.

Escalante J, Chen W-H, Tabatabaei M, Hoang AT, Kwon, EE, Lin, K-YA, et al (2022) Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112914.

Horikawa Y, Hirano S, Mihashi A, Kobayashi Y, Zhai S, Sugiyama J (2019) Prediction of Lignin Contents from Infrared Spectroscopy: Chemical Digestion and Lignin/Biomass Ratios of *Cryptomeria japonica*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 188.

Li X, Wei Y, Xu J, Xu N, He Y (2018) Quantitative visualization of lignocellulose components in transverse sections of moso bamboo based on FTIR macro- and micro-spectroscopy coupled with chemometrics. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 263.

Lin Y-Y, Chen W-H, Colin B, Petrissans A, Quirino R, Pétrissans M (2022) Thermodegradation characterization of hardwoods and softwoods in torrefaction and transition zone between torrefaction and pyrolysis. *Fuel*, 310, 122281.

López-González D, Parascanu MM, Fernandez-Lopez M, Puig-Gamero M, Soreanu G, Avalos-Ramírez A, et al (2017) Effect of different concentrations of O<sub>2</sub> under inert and CO<sub>2</sub> atmospheres on the swine manure combustion process. *Fuel*, 195, 23-32.

Petrissans A, Lin Y-Y, Nguyen T, Colin B, Quirino R, Rios-Teixeira P, et al (2022) Influence of the heating rate on the thermodegradation during the mild pyrolysis of the wood. *Wood Material Science & Engineering*, 18, 1-10.

Sharma A, Garg S, Sharma V (2024) ATR-FTIR spectroscopy and Machine learning for sustainable wood sourcing and species Identification: Applications to wood forensics. *Microchemical Journal*, 200, 110467.

Song G, Shen L, Xiao J, Chen L (2013) Estimation of Specific Enthalpy and Exergy of Biomass and Coal Ash. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(9), 809-816.

## Tronçonnage du bois de chêne basé sur la mesure de l'orientation des fibres pour garantir la résistance des aboutages

SOH MBOU Delin<sup>1</sup>, POT Guillaume<sup>1</sup>, VIGUIER Joffrey<sup>1</sup>, MARCON Bertrand<sup>1</sup>,  
MILHE Louis<sup>1</sup>, CHASTAGNIER Thibault<sup>2</sup>, LOUVET Thibaut<sup>2</sup>,  
LANVIN Jean-Denis<sup>3</sup>, REULING Didier<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Rue porte de Paris, 71250 Cluny, France.

<sup>2</sup> Ducerf Groupe, Le Bourg, 71120 Vendennes-lès-Charolles, France.

<sup>3</sup> FCBA, Allée de Boutaut BP227, 33028 Bordeaux, France.

[Delin.SOH\\_MBOU@ensam.eu](mailto:Delin.SOH_MBOU@ensam.eu)

**Mots clés :** Aboutages ; chêne ; orientation des fibres ; sciages ; tronçonnage.

### Contexte et objectif

#### *Contexte*

L'aboutage est une technique d'assemblage de courts morceaux de bois, appelés courçons, pour former des pièces plus longues et continues. Cette méthode est particulièrement utile pour les feuillus, permettant d'extraire les imperfections au sein des planches et de reconstituer des produits structurels. Les pièces sont usinées en forme de dents, emboîtées, collées, puis pressées pour assurer une jonction solide.

Selon la norme NF EN 14080 (2013), la résistance d'un aboutage doit être assurée en comparant sa distance au nœud le plus proche et le diamètre du nœud en question : "En dehors de l'aboutage, la distance entre le bord d'un nœud et la base d'un aboutage à entures multiples ne doit pas être inférieure à trois fois le diamètre du nœud  $d$ , à moins qu'une procédure de classement approuvée ne soit utilisée et qu'il soit démontré par des essais qu'une résistance adéquate des aboutages à entures multiples est atteinte avec une plus faible distance minimale".

#### *Objectif*

L'objectif du présent travail est de définir une méthode basée uniquement sur les données d'orientation des fibres obtenues par scan des surfaces planches pour effectuer les opérations de tronçonnage, en garantissant à la fois la résistance des aboutages et celle des courçons entre les aboutages dans le cas de bois de chêne de qualité secondaire. Cette approche vise à proposer une méthode automatisée et standardisée pour assurer la résistance des aboutages qui pourrait être plus cohérente et plus efficace que la méthode visuelle actuelle en particulier pour les bois feuillus.

### Matériel et Méthode

#### *Calcul de l'orientation des fibres dans un sciage*

L'échantillonnage sur lequel s'est basée cette étude est constitué de deux lots de 572 mm de longueur en moyenne. Le premier lot de de pièces de section  $19.5 \times 69.5 \text{ mm}^2$  a été utilisé pour garantir une classe de résistance en traction nommée ici T11 et équivalent à D18 (classe de la norme (EN 338, 2016). Le second lot est lui de pièces de section  $19.5 \times 100 \text{ mm}^2$ , et a été utilisé pour garantir une classe de résistance en traction nommée ici T14 et équivalent à D24. L'objectif est l'utilisation de bois de faible largeur, à faible coût économique pour la fabrication des produits bois collés tels que les lamelles aboutées. Un scanner industriel a été utilisé pour



analyser les planches. Comme proposé par Besseau (2021), l'angle de fibre 3D a été calculé en interpolant les angles planaires mesurés sur les faces et chants d'une planche de bois.

#### *Module élastique local basé sur l'orientation des fibres*

En l'absence d'une méthode automatique et précise de différenciation entre la direction radiale et la direction tangentielle, un modèle isotrope transverse a été choisi. Le module d'élasticité longitudinal  $E_0$  a été fixé à 95 % du percentile des résultats des essais de traction sur un lot de planches issues de la même ressource (Pot et al 2024), soit 14 620 MPa. Le choix de cette valeur rend les résultats des modules d'élasticité locaux modélisés cohérents avec les modules d'élasticité mesurés. La valeur de  $E_0$  a néanmoins influencé les autres propriétés du matériau telles que le module d'élasticité transversal  $E_{90}$  et le module de cisaillement  $G_{LTrans}$ . En effet,  $E_{90}$  a été calculé comme la moyenne des rapports orthotropes ( $E_R/E_L$  et  $E_T/E_L$ ) donnés par Kretschmann (2010) pour le chêne blanc (Tab. 1) multipliée par  $E_0$ .  $G_{LTrans}$ , le module de cisaillement dans le plan isotrope transverse, a été calculé de manière similaire comme la moyenne des rapports orthotropes de Kretschmann ( $G_{LT}/E_L$  et  $G_{LR}/E_L$ ) multipliée comme précédemment par  $E_0$ . Le coefficient de Poisson transverse  $\nu_{Trans}$ , lui a été calculé comme la moyenne des coefficients de Poisson orthotropes de Kretschmann ( $\nu_{LT}$  et  $\nu_{LR}$ ). Le Tab. 1 résume les propriétés mécaniques utilisées. Ces propriétés permettent d'exprimer la matrice des complaisances  $[S]$  dans le repère local du matériau ( $\vec{L}, \vec{Trans}$ ).

Tab. 1: Propriétés mécaniques du chêne selon (Kretschmann, 2010) et propriétés mécaniques isotropes transverses simplifiées utilisées dans ce présent travail.

$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
<b>14000</b>	2280	1010	1200	1100	0.37	0.43
$E_0$	$E_{90}$	$G_{LTrans}$		$\nu_{LTrans}$		
(MPa)	(MPa)	(MPa)				
<b>14620</b>	1718	1201		0.4		

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\nu_{TransL}}{E_{90}} & 0 \\ -\frac{\nu_{LTrans}}{E_0} & \frac{1}{E_{90}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LTrans}} \end{bmatrix}$$

Pour chaque élément de la grille d'angles interpolés  $\gamma_{xyz}$ , la matrice des complaisances  $[S]$  a été obtenue par rotation en fonction de  $\gamma_{xyz}$ , afin d'obtenir la matrice des complaisances locales  $[S']$  pour chaque position dans le système d'axes de l'échantillon ( $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ ). Le module élastique local longitudinal (selon  $\vec{x}$ ) est obtenu par inversion du premier terme de la matrice des complaisances  $[S']$ . La rigidité locale longitudinale moyenne a été calculée pour chaque section transversale, tous les millimètres dans la longueur. Le module élastique axial apparent,  $E_{a,BT}(x)$ , est calculé comme la moyenne glissante harmonique de la rigidité locale, c'est-à-dire calculé comme la raideur équivalente des ressorts en série de raideurs individuelles (Pot et al. 2024) sur une longueur choisie de 90 mm (Olsson et al 2018, Briggert et al 2018). Le module  $E_{a,BT}(x)$  minimum sur le profil de chaque planche est utilisée comme indicateur de la résistance à la traction, en supposant que la résistance est corrélée à cette rigidité minimum.

#### *Optimisation du tronçonnage des planches pour assurer la résistance des lamelles aboutées*

La correspondance entre la résistance à la traction et l'indicateur de résistance à la traction utilisé a été obtenue sur la base de plus de 900 essais de sciages de bois de chêne (Pot et al 2024). Ces valeurs indicatrices de résistance exprimées ici en termes de modules élastiques

pourraient être aussi exprimées en termes d'angle moyen dans la section (Tab. 2). Des opérations de tronçonnage ont ensuite été réalisées en se basant sur cet indice pour déterminer les positions de tronçonnage optimales, assurant ainsi la résistance des morceaux de bois et des aboutages pour une classe de résistance donnée (Fig. 1).

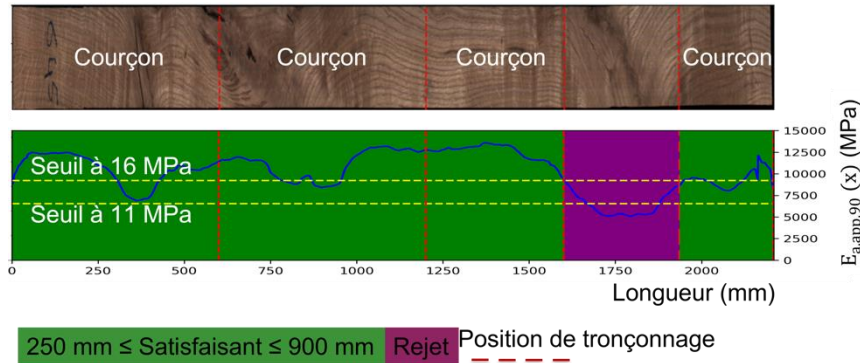


Fig. 1 : Exemple d'application de l'algorithme de tronçonnage pour une classe de résistance T11. En vert les pièces conservées et en violet les pièces rejetées

### Résultats et discussions

Les courçons obtenus ont été assemblés par aboutage à entures multiples dans l'usine des bois Profilés (71), et la méthode a été validée par des essais de traction (Fig. 2, Tab 2.). Les aboutages des planches de  $19.5 \times 69.5 \text{ mm}^2$  (classe T11) ont été testés à l'ENSAM de Cluny et celles de  $19.5 \times 100 \text{ mm}^2$  (classe T14), à FCBA de Bordeaux.

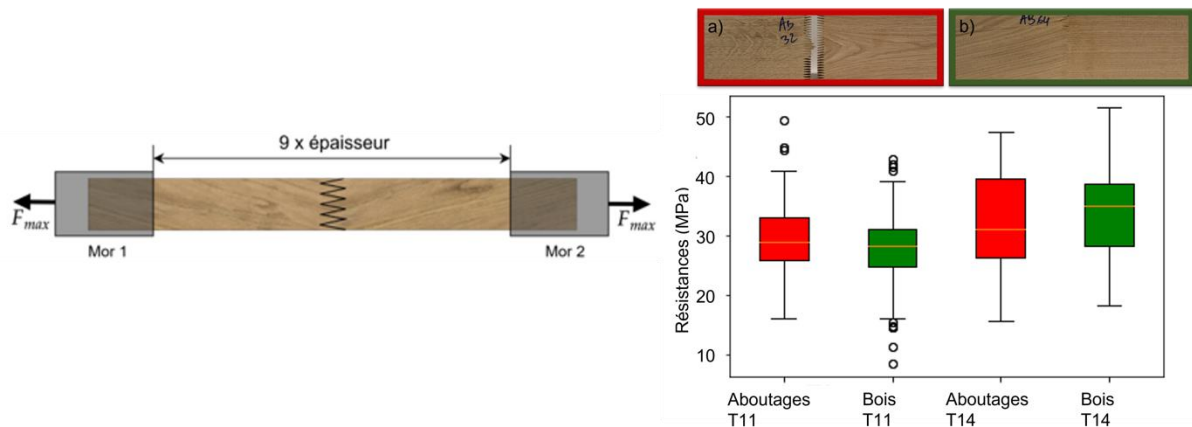


Fig. 2 : Distribution des résistances obtenues : à gauche les conditions d'essai et à droite, a) rupture dans l'aboutage ; b) rupture dans le bois

Tab. 2 : Résultats des essais de traction des aboutages

Classe	T11		T14	
	Bois	Aboutage	Bois	Aboutage
Type de rupture	Bois	Aboutage	Bois	Aboutage
Résistance caractéristique cible (MPa)	11	16	14	19
Valeur seuil de l'indicateur $E_{a,app}$ (MPa)	$6.55 \times 10^3$	$9.23 \times 10^3$	$8.58 \times 10^3$	$10.14 \times 10^3$
Angle seuil de l'indicateur (°)	21.8	14.7	16.2	12.7
Nombre d'échantillons	183		178	
	120	63	105	73
Pourcentage de la population	69%	31%	59%	41%
Résistance caractéristique (MPa)	15.6		19.4	
	14.0	20.5	21.2	18.5

Les résultats obtenus démontrent que la méthode garantit effectivement les résistances attendues pour les classes spécifiées, ce qui est un indicateur fort de son efficacité. Pour les éprouvettes de la classe T11, la résistance caractéristique obtenue est 15.6 MPa, soit 0.4 MPa en dessous du seuil, alors que pour les éprouvettes de la classe T14, la résistance caractéristique obtenue est 19.4 MPa, soit 0.4 MPa au-dessus du seuil. La différence de résistance entre les ruptures dans les entures (20.5 MPa) et celles dans le bois (14.0 MPa) est significative pour les éprouvettes T11. La faible résistance s'explique par des ruptures fréquentes dans le bois de moindre qualité, souvent trop éloignées des entures pour être considérées comme liées à la résistance des aboutages. La supériorité de la classe T14 permet d'utiliser un bois de meilleure qualité, ce qui se traduit par des pièces de bois aux caractéristiques nettement supérieures, notamment en termes de résistance, dépassant ainsi celles obtenues par aboutage.

### Conclusions et perspectives

En se basant uniquement sur la mesure de l'orientation des fibres des sciages, cette méthode propose une approche innovante de gain de résistance ce qui pourrait transformer les pratiques industrielles actuelles. Des améliorations sont possibles, par exemple du fait que les profils ont été moyennés sur une longueur de 90 mm centrée, une pratique qui peut introduire des imprécisions dans la détermination des positions optimales de tronçonnage.

Des recherches supplémentaires pourraient se concentrer sur la quantification du rendement matière lors du tronçonnage, ce qui permettrait non seulement d'affiner la technique, mais aussi de démontrer sa viabilité économique dans un contexte industriel.

### Remerciements

Ce projet est en collaboration avec FCBA et est soutenu financièrement par l'ADEME au travers de deux projets de recherche TreCEffiQuaS et Feuillus CHOC, dont le but est de valoriser les essences feuillues secondaires dans la construction.

### Références

Besseau B (2021) Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne (These de doctorat). HESAM.

Briggert A, Hu M, Olsson A, Oscarsson J (2018) Tracheid effect scanning and evaluation of in-plane and out-of-plane fibre direction in Norway spruce using. *Wood and Fiber Science* 50, 411–429.

EN 338, 2016. Structural timber — Strength classes.

Kretchmann D (2010) Mechanical Properties of Wood, in: *Wood Handbook*.

NF EN 14080 (2013) Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences.

Olsson A, Pot G, Viguier J, Faydi Y Oscarsson J (2018) Performance of strength grading methods based on fibre orientation and axial resonance frequency applied to Norway spruce (*Picea abies* L.), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and European oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl./*Quercus robur* L.). *Annals of Forest Science* 75, 102 p. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0781-z>

Pot G, Viguier J, Besseau B, Lanvin J.-D, Reuling D (2024) Modelling tensile mechanical properties of oak timber from fibre orientation scanning for strength grading purpose, in: 11th Hardwood Conference. Presented at the 11th Hardwood Conference, Sopron, Hungary.

## Bio-inspired wooden hygro-actuators: bilayer structures

ARNOULD Vincent<sup>1,2</sup>, CHEN Shuoye<sup>1</sup>, MATSUO-UEDA Miyuki<sup>3</sup>, GRIL Joseph<sup>4</sup>,  
JAAFARI Chaimaa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Japan

<sup>2</sup>Polytech Clermont, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand

<sup>3</sup>Faculty of agriculture, Kyoto University, Japan

<sup>4</sup>Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut pascal, Clermont-Ferrand

[vincent.arnould2@gmail.com](mailto:vincent.arnould2@gmail.com)

**Key words:** Wood Bilayer; Hygro-actuated; Smart Building System; Sustainable Application

### Context and objectives

Wooden hygro-actuators are a sustainable solution for mechanisms that require cyclic movements. These actuators are inspired by natural phenomena. To adapt to their environment; many plants use hygroscopic movement which is a shape changing movement that does not consume energy (Zhan et al 2023). This hygroscopic movement can be reproduced thanks to wooden bilayer structures using the differential shrinkage and swelling of wood.

The bilayer is a wooden structure which uses the differential shrinkage and swelling between two linked pieces of wood in order to make the system curve (Fig. 1). This differential shrinkage is created by choosing two wooden layers from different species of wood with different shrinkage rate and by using pieces with the direction of the fibers orthogonal from one to the other, which allows, when the relative humidity changes, one layer cut along the tangential direction (called active layer) to shrink more than the other layer cut along the longitudinal direction (called the passive or resistive layer).

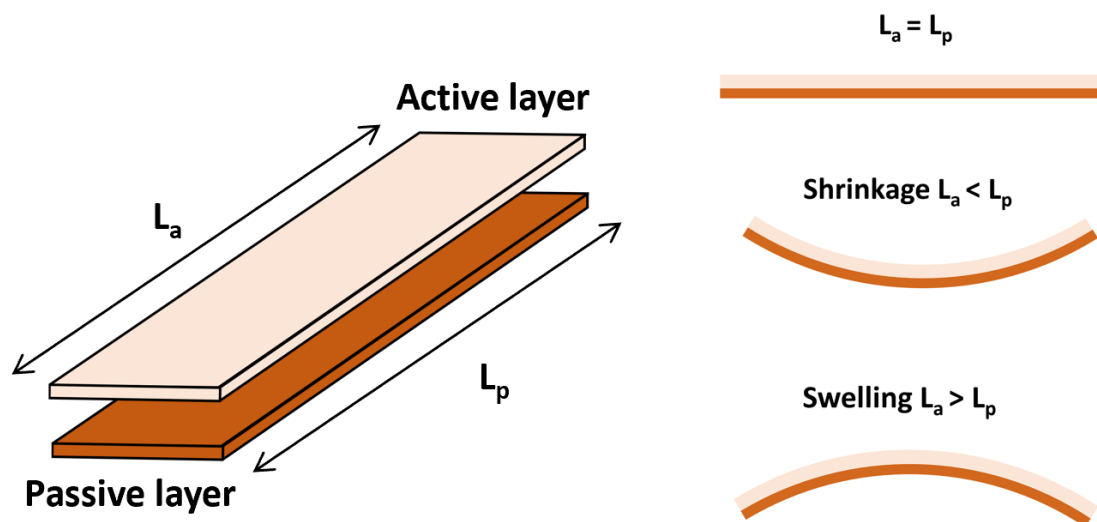


Fig. 1: Bilayer concept

The aim of the following research, in collaboration between Kyoto University and the Japanese company Kozo Keikaku Engineering, is to develop a triangular system of bilayer structures equipped with a fabric that will extend to produce shadow when humidity is low, i.e. when the sun is high during the day, without requiring an energy supply to operate.

The final aim of the project consists of assembling several triangle frames (Fig. 2a) into a large structure which could be used as a facade in front of a building (Fig. 2b). This facade would bring sunlight and air into the building by autonomously adjusting the solar shading area by letting in or blocking light in response to changes in relative humidity during the day. The goal of this present research is to study the feasibility of the smart umbrella project by studying the behavior of some prototypes and by studying the impact of a long period of use on the mechanical properties of the bilayers. The objective is to lead experiments which aim to characterize the wood used (hygroscopic and mechanical behavior) and the behavior of the prototypes in outdoor situations and controlled environments.

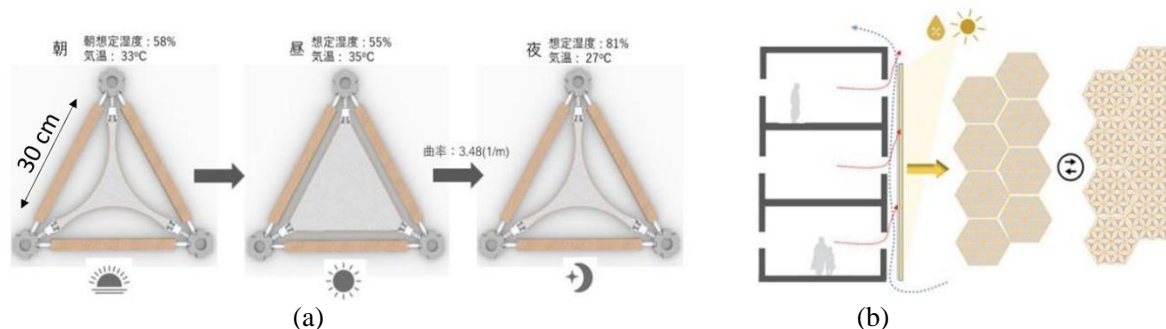


Fig. 2: Project : (a) Prototype ; (b) application concept (Yucel et al 2023).

## Material and methods

Four prototypes of frames were considered and equipped with two different types of fabric (Fig. 3), one rigid and thick, the other one very flexible and thin, in order to test them and compare their behavior. Two methods were used to assemble the fabric on the bilayers: the use of adhesive (frame 1) and the use of staples (frame 2 and 4).

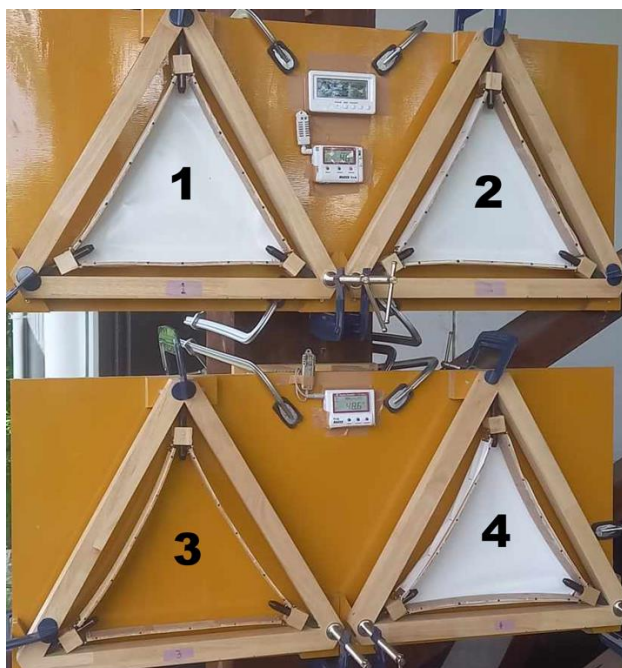


Fig. 3: The four prototypes. 1: Fabric: glass fiber coated with polyvinyl chloride (0.53 thick), assembled using adhesive. 2: Fabric: glass fiber coated with polyvinyl chloride (0.53 thick), assembled using stapler. 3: No fabric. 4: Fabric: polyester, assembled using a stapler.

The frames were left outside for eight days and filmed with a camera (TLC 200 from Brinno, Format JPEG 1280x720) taking one picture every five minutes (pictures examples on Fig. 4) with humidity and temperature sensors. The images were analyzed by a deep learning model, based on the work of Olaf Ronneberger (U-Net) (2015), which, after training, is able to measure the curvature of each bilayer for each picture.

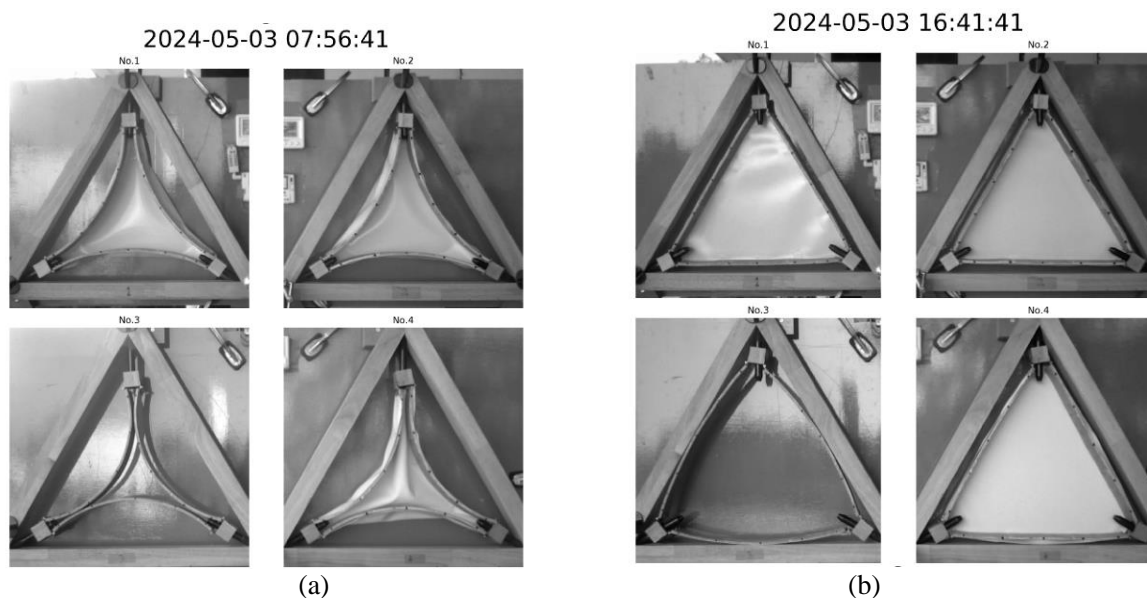


Fig. 4: Pictures taken by the camera: (a) Prototype closed (RH80%); (b) Prototype open (RH30%)

## Results and discussion

The results (Fig. 5) show that the curvature of the frames follows the same trend as the evolution of the outside relative humidity, which was expected. Moreover, there are some differences between the curvature of each frame. The maximum curvature (highly visible on the morning of the three first days) is the largest for frame 3, then frame 4, and finally frame 1 and 2. This shows that the rigid fabric is restraining the movement of frames 1 and 2, whereas frame 4 with the elastic fabric has a larger curvature that is smaller than that of frame 3 which has no fabric. In addition, when the humidity is lower than 45% (humidity aimed for flat state) the bilayer is supposed to curve in the opposite direction, however at the end of the afternoon, this reverse curvature was visible only for frame 3 (no fabric), thus the frames with fabric cannot curve in the other direction, indeed the fabrics being not very elastic, it prevents the frames to curve in the other direction, which may create some internal forces that could damage the prototype in the long-term.

As the final product is supposed to be used outside for a long time, the long-term behavior of the prototype is important. In order to characterize the behavior of the bilayers during time, four bilayers were subjected to a one-month experiment in a controlled chamber. The chamber was set in a way that the relative humidity inside follows an evolution close to the evolution of the outside humidity for one day, and this cycle was repeated every day for 26 days. The four bilayers were put in the chamber with the same camera used during the outside experiment, a picture was taken every five minutes, and the curvature was measured with the deep learning model. Thus, the results obtained on Fig. 6 display a decrease in the maximum curvature reached by the bilayers every cycle. This decrease is very small (less than 5% after 26 cycles) so it does not compromise the use of the prototype, however, tests on a longer period (6 months or one year) would be interesting to conduct, in order to see if the decrease continues or if the value of the maximum curvature stabilizes from a certain number of cycles.

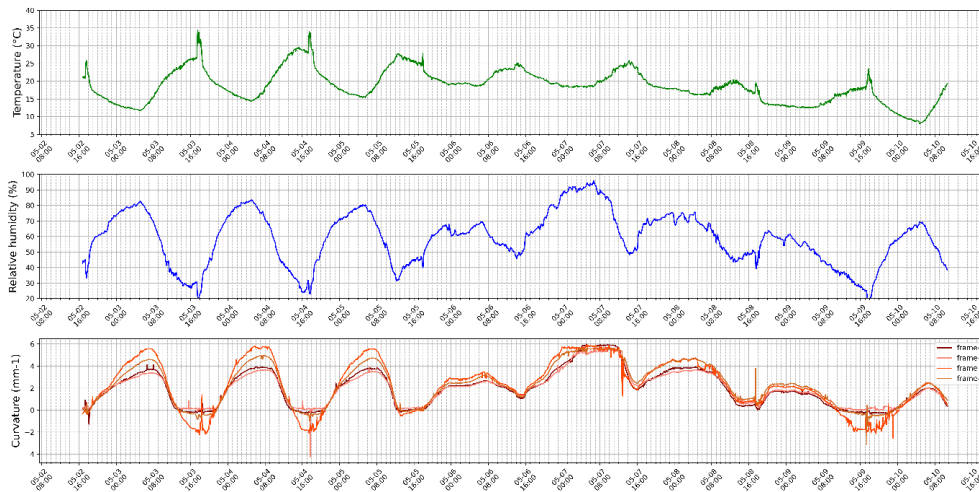


Fig. 5: Results for the eight days outdoor experiment.

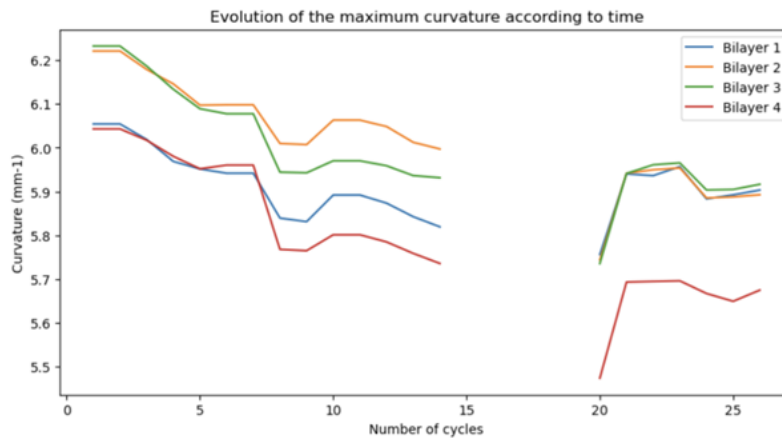


Fig. 6: Evolution of the maximum curvature of the bilayers according to the number of cycles undergone.

Finally, although the long-term behavior of the bilayers is not clearly known, the prototypes are working, the cycle of opening and closing of the frames follows the natural cycle of humidity outside as intended. Regarding the assembling of the fabric on the frame, two methods have been tested: the use of adhesive and the use of a stapler. The adhesive gives a good and reliable result however, the glue takes some time to dry and the fabric has to be held against the wood while the glue is drying, which is not suitable for an industrial process. On the other hand, the use of a stapler is more efficient and quicker but the staples, when put in wood, can damage the prototype and create some cracks in the wood. To improve the assembling method, a way of putting the staples that prevents any cracks from appearing should be designed in order to have a reliable and efficient process.

## References

Ronneberger O, Fisher P, Brox T (2015) U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation.

Yucel M, Sugiyama J, Isoda H, Matsuo M, Nakagawa T, Chen S, Rui L (2023) Design, Fabrication and Full-Scale Experiment of a Prototype That Utilizes the Plant Characteristics.

Zhan T, Rui L, Zhiting L, Hui P, Jianxiong L (2023) From adaptive plant materials toward hygro-actuated wooden building systems: A review.

## Caractérisation élastique complète d'un petit échantillon de bois par interférométrie laser

TOULGOAT Killian<sup>1</sup>, SAPEY Grégoire<sup>1</sup>, LAUX Didier<sup>1</sup>, AUGEREAU Franck<sup>1</sup>, ARNOULD Olivier<sup>2</sup>, ROSENKRANTZ Eric<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IES, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

<sup>2</sup>LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

[killian.toulgoat@umontpellier.fr](mailto:killian.toulgoat@umontpellier.fr)

**Mots clés :** bois ; caractérisation ultrasonore ; comportement élastique ; matériau orthotrope ; vitesses de phase et de groupe ; interféromètre laser

### Introduction

Le génie mécanique, en particulier le domaine du transport, a besoin de matériaux très techniques qui ont souvent un impact environnemental élevé causé par leur composition (propriétés effectives moyennes), leur extraction ou leur processus de transformation énergivore. Le bois, ressource naturelle connue pour son excellent rapport propriétés mécaniques/densité, représente une des solutions aux enjeux climatiques actuels, notamment dans le domaine de l'éco-construction mais aussi pour le génie mécanique (Castanié et al 2024). Actuellement, le manque de connaissance des propriétés mécaniques dans toutes les directions d'orthotropie d'une pièce de bois est un obstacle à l'utilisation plus systématique du bois dans la construction et le génie mécanique. Cette méconnaissance est due à la complexité de ce matériau organique, en particulier sa grande variabilité intra et inter-espèces. La nature organique du bois implique que sa composition ne peut pas être finement contrôlée et qu'une grande hétérogénéité, telle que des nœuds, des gradients hydriques ou un mauvais alignement des fibres (angle de fil) peuvent se produire. Chaque pièce en bois nécessite une caractérisation approfondie avec une méthode rapide et robuste pour prédire son comportement viscoélastique tridimensionnel. Pour y parvenir, nous proposons d'optimiser, voire d'adapter, les méthodes ultrasonores déjà existantes à la complexité du bois. Une nouvelle méthode expérimentale est ainsi proposée pour caractériser entièrement un petit échantillon de bois en mesurant les champs de vitesses acoustiques à sa surface.

### Contexte et objectifs

La méthode ultrasonore usuelle consiste à mesurer la vitesse dans les directions principales des échantillons. Cette méthode est souvent appliquée en utilisant plusieurs échantillons usinés suivant différentes orientations afin d'avoir les faces nécessaires sur lesquelles placer l'émetteur et le récepteur pour effectuer une mesure en transmission. Malheureusement, ces mesures ne permettent généralement de déterminer avec précisions que les coefficients diagonaux de la matrice de rigidité et, lorsque les coefficients sont mesurés sur différents échantillons, ils sont impactés par la variabilité du bois. Des méthodes d'analyse modale, telles que la RUS (Resonant Ultrasound Spectroscopy), sont également utilisées car elles permettent en général d'identifier plus de coefficients élastiques sur un même échantillon. Toutefois suivant la géométrie de l'échantillon, en raison du manque de sensibilité de la mesure à certains coefficients, seuls certains termes diagonaux de la matrice de rigidité (en particulier les modules de cisaillement) peuvent être estimés avec précision (Longo et al 2018).



## Matériel et méthode expérimentale

Les mesures ont tout d'abord été effectuées pour déterminer la matrice de rigidité d'un échantillon isotrope transverse et d'un échantillon orthotrope. L'échantillon isotrope transverse est un composite à matrice époxy contenant des fibres de verre. Ce composite est utilisé pour valider la méthode expérimentale. L'échantillon orthotrope est un cube de hêtre de 20 mm de côté et de densité  $668 \text{ kg/m}^3$  à l'ambiante. S'agissant de premières mesures équivalent à des tests, aucune mesure d'hygrométrie n'a été effectuée sur l'échantillon de bois. L'excitation acoustique est induite par un transducteur piézoélectrique (Sonaxis CMP83) avec une fréquence centrale de 2 MHz et une taille d'élément nominale de 6 mm de diamètre. Le transducteur est excité par un générateur d'impulsion (JSR modèle DPR300). Le transducteur est placé sur un sommet de l'échantillon. Les ondes acoustiques sont transmises à l'échantillon par une goutte de miel (utilisé comme agent de couplage) et leur déplacement est mesuré sur toute une face de l'échantillon à l'aide d'un interféromètre laser (Polytec OFV-5000). En effet, grâce à l'effet Poisson, toutes les ondes acoustiques ont une composante normale à la face, même les ondes de compression, ce qui permet de les mesurer avec l'interféromètre laser. En balayant la surface avec ce laser, on capture ainsi la propagation des fronts d'onde, ce qui permet d'estimer leurs vitesses. La position des points de mesure laser, correspondant aux récepteurs, est contrôlée par une plateforme motorisée avec une précision en déplacement de  $1 \mu\text{m}$ . Enfin, la vitesse de l'onde de compression est déterminée pour chaque angle en calculant le temps de vol relatif entre la source ponctuelle et chaque récepteur pour une direction de propagation donnée. La source et les récepteurs étant placés avec précision, l'incertitude sur la mesure de la vitesse est faible (de l'ordre de  $\pm 100 \text{ m/s}$ ).

## Résultats

Lors des mesures expérimentales ultrasonores, il peut y avoir une ambiguïté concernant la vitesse mesurée. En effet, il existe la vitesse de groupe, qui est la vitesse du trajet direct entre la source et le récepteur, et la vitesse de phase qui correspond à la vitesse du front d'onde. Ces deux vitesses ont été tracées sur la Fig. 1.

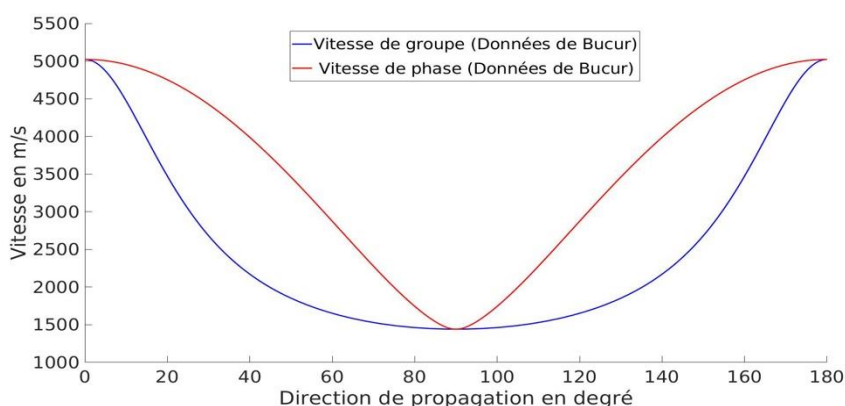


Fig. 1 : Comparaison des vitesses ultrasonores dans un échantillon de hêtre dans le plan LT obtenues à partir des modèles analytiques des vitesses de phase et de groupe en utilisant les équations de Christoffel (Mavko et al 2009) et les coefficients mesurés par Bucur et Archer (1984)

On observe un écart important entre la vitesse de groupe et la vitesse de phase. Cet écart est d'autant plus important que la direction de propagation ne correspond pas à une direction principale. En effet, dans le sens du fil ( $0^\circ$  ou  $180^\circ$ ) ou perpendiculairement au fil ( $90^\circ$ ), la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe. Dans notre cas, une vitesse de groupe est mesurée expérimentalement sans ambiguïté, car la source et les récepteurs sont ponctuels. En effet, le contact entre la source et l'échantillon se fait en un point (un des sommets) et la

dimension des récepteurs est celle de la tâche focale du laser mesurant plusieurs centaines de micromètres de diamètre. Cette ambiguïté entre les deux vitesses pose souvent des problèmes d'interprétation des mesures dans les milieux anisotropes (Dellinger et Vernik 1994).

La première série de mesures a été effectuée dans le plan longitudinal tangentiel (LT) du cube de hêtre. La vitesse des ultrasons en fonction de la direction de propagation est donnée sur la Fig. 2. Les données expérimentales sont comparées aux vitesses de groupe calculées analytiquement à partir des équations de Christoffel (Mavko et al 2009) en utilisant la review des coefficients de rigidité du hêtre donnée dans Longo et al (2018). A partir des coefficients extrema, l'intervalle de confiance des vitesses a été tracé sur la Fig. 2.

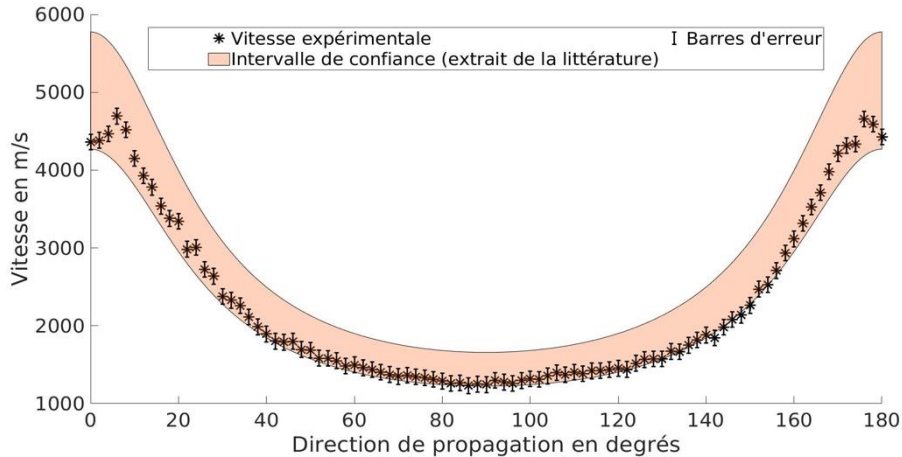


Fig. 2 : Comparaison des vitesses ultrasonores expérimentales d'un échantillon de hêtre dans le plan LT avec les données recensées dans la littérature (Longo et al 2018) ; les barres d'erreur sont représentées à une fois les écarts-types

Les vitesses expérimentales ont été ajustées par méthode inverse, la courbe ajustée est tracée sur la Fig. 3. L'initialisation est donnée par le modèle de Guitard et El Amri (1987) qui permet d'estimer les coefficients de la matrice de rigidité (Tab. 1) pour un échantillon de feuillus à partir de sa masse volumique. Les coefficients de la matrice de rigidité qui permettent d'ajuster les données expérimentales via l'identification inverse sont donnés dans le Tab. 1 également.

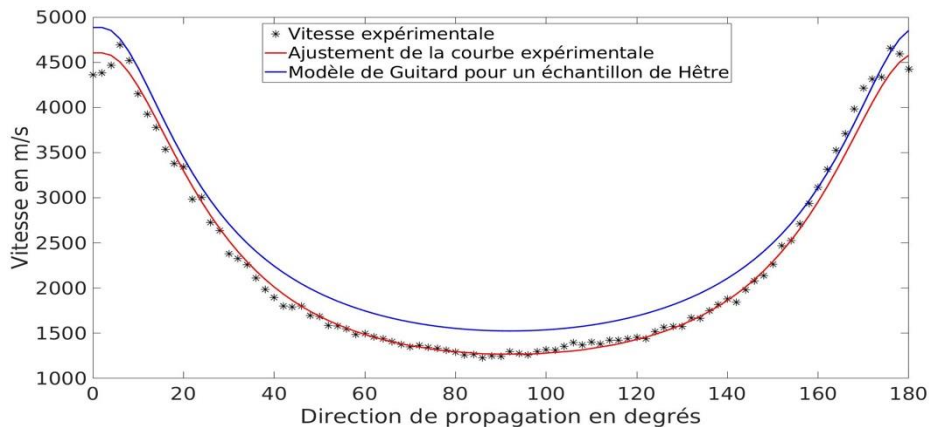


Fig. 3 : Ajustement de la courbe expérimentale par méthode inverse à partir des coefficients élastiques donnés par le modèle de Guitard et El Amri (1987)

Tab. 1 : Coefficients de la matrice de rigidité (en GPa) donnés par le modèle de Guitard (1987) et obtenus par ajustement des données expérimentales d'un échantillon de hêtre dans le plan LT (Fig. 3)

Coefficients de la matrice de rigidité (GPa)	Modèle de Guitard – initialisation (GPa)	Identification par méthode inverse (GPa)
$C_{TT}$	1,57	1,08
$C_{LL}$	16,09	14,29
$C_{LT}$	1,15	1,28
$G_{LT}$	1,02	0,99

## Conclusion et perspectives

Ce résumé présente une nouvelle méthode de caractérisation des propriétés mécaniques des échantillons bois. La méthode s'appuie sur la mesure de la propagation du front d'onde ultrasonore en différents points de l'une des surfaces de l'échantillon. La vitesse des ondes de compression est mesurée dans l'un des plans d'anisotropie. On peut noter que, en fonction des conditions expérimentales, il est très important d'adapter le modèle analytique. Dans le cas de la méthode présentée dans ce résumé, la vitesse mesurée est celle de groupe. Une limitation est que cette méthode expérimentale est actuellement appliquée à de petits échantillons de bois coupés loin de la moelle et bien orientés. Cela nous permet de supposer une symétrie orthotrope cartésienne plutôt qu'un comportement orthotrope en repère cylindrique. Une comparaison entre les données expérimentales et la vitesse analytique dans le plan LT d'un échantillon cubique de hêtre montre le potentiel de cette méthode pour déterminer l'ensemble de la matrice de rigidité par méthode inverse.

## Remerciements

Nous remercions la Région Occitanie et l'Ecole Doctorale I2S (Université de Montpellier) pour leur soutien financier au projet WooFIE.

## Références

- Bucur V, Archer RR (1984) Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, 18(4), p. 255-265.
- Castanié B, Peignon A, Marc C, Eyma F, Cantarel A, Serra J, Curti R, Hadji H, Denaud L, Girardon S, Marcon B (2024) Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review, *Composite Structures*, 329: 117790.
- Dellinger J, Vernik L (1994) Do traveltimes in pulse-transmission experiments yield anisotropic group or phase velocities? *Geophysics*, 59(11), p. 1774-1779.
- Guitard D, El Amri F (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des Sciences Forestières*, 44(3), p. 335–358.
- Longo R, Laux D, Pagano S, Delaunay T, Le Clézio E, Arnould O (2018) Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): A comprehensive study, *Wood Science and Technology*, 52, p. 383-402.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin, J (2009) Elasticity and Hooke's law. In: *The rock physics handbook*, second edition. Cambridge University press, p. 21-80.

## Coefficients of friction between dowel-type fasteners and wood in timber connections

REMOND Valentine<sup>1</sup>, HO Ai Phien<sup>2</sup>, SEIM Werner<sup>2</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Dpt. of Building Rehabilitation and Timber Engineering, University of Kassel, Germany

<sup>3</sup>CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

valentine.remond2002@gmail.com

**Key words:** Extended Model; dowel-type; rope effect; friction; coefficient of friction

### Context and objectives

Dowel-type fasteners (namely screws, bolts, dowels, nails, and staples) are widely used in structures. In Eurocode 5, their design is based on the European Yield Model proposed by Johansen (Johansen 1949). It was assumed that failure occurs either because of embedment failure in the wood, or because of a combination of embedment failure and plastic hinges in the fastener. The characteristic load-carrying capacity per shear plane per fastener  $F_{v,Rk}$  is estimated by taking the minimum value of all the failure modes. For failure modes involving an inclination of the fastener, the term  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$  is added to represent the contribution to the rope effect. Indeed, when a connection is laterally loaded, a tensile force is created along the fastener. For fasteners capable of withstanding this force, such as those with threads or nuts and washers, the resistance of the connection can be strongly increased. The tensile force generates friction in the connection, either between the two connected elements or between the fastener and the surrounding wood. The latter is not considered in Eurocode 5. In fact, the  $\frac{1}{4}$  factor only corresponds to a wood-to-wood coefficient of friction (COF).

The Extended Model was developed to provide a more realistic representation of the lateral load carrying capacity of wood-to-steel connections using screws or profiled nails (HO 2023). In this new model, the tensile force along the fastener is calculated for profiled nails and for the smooth part of partially threaded screws, by using a wood-to-steel COF. This coefficient is the focus of the present report.

Wood-to-steel COF have already been studied previously, but usually with methods involving the friction of two flat surfaces. Here, a different test setup was used, to specifically study friction at embedment failure area. The influence of several parameters on the COF was studied. Different types of nails were used, including smooth, profiled, and corroded nails; different types of wood, such as structural wood C24, Laminated Veneer Lumber (LVL), and Oriented Strand Board (OSB) with two directions of the surface fibres; different moisture contents (MC) of the wood specimens; and different nail diameters.

### Material and methods

A biaxial testing machine was used where both the contact force  $F_N$  and the pull-out force  $F_f$  can be measured simultaneously. Two parts of a wood specimen are placed on a wood block (6) (Fig. 1). A nail is placed vertically between the two parts of the specimen and the head of the nail is held by a hollow element (5). The block (6) is drilled in the centre so that the nail is only in contact with the wood specimen and no additional friction occurs. Four steel plates (7)

are used to prevent the specimen from moving. By turning a spanner, a socket screw (1) is tightened until  $F_N$  is applied. This socket screw is threaded into a fixed steel plate (2) and pressed on a load cell (3). The load cell is connected to a sliding steel plate (4), which transmits  $F_N$  to the wood specimen and subsequently to the nail. As a result, the nail is pressed between the two wood elements. Then, the nail is extracted from the wood as the lower section of the machine moves downward. Before each test, the nail was pre-pressed against the wood.

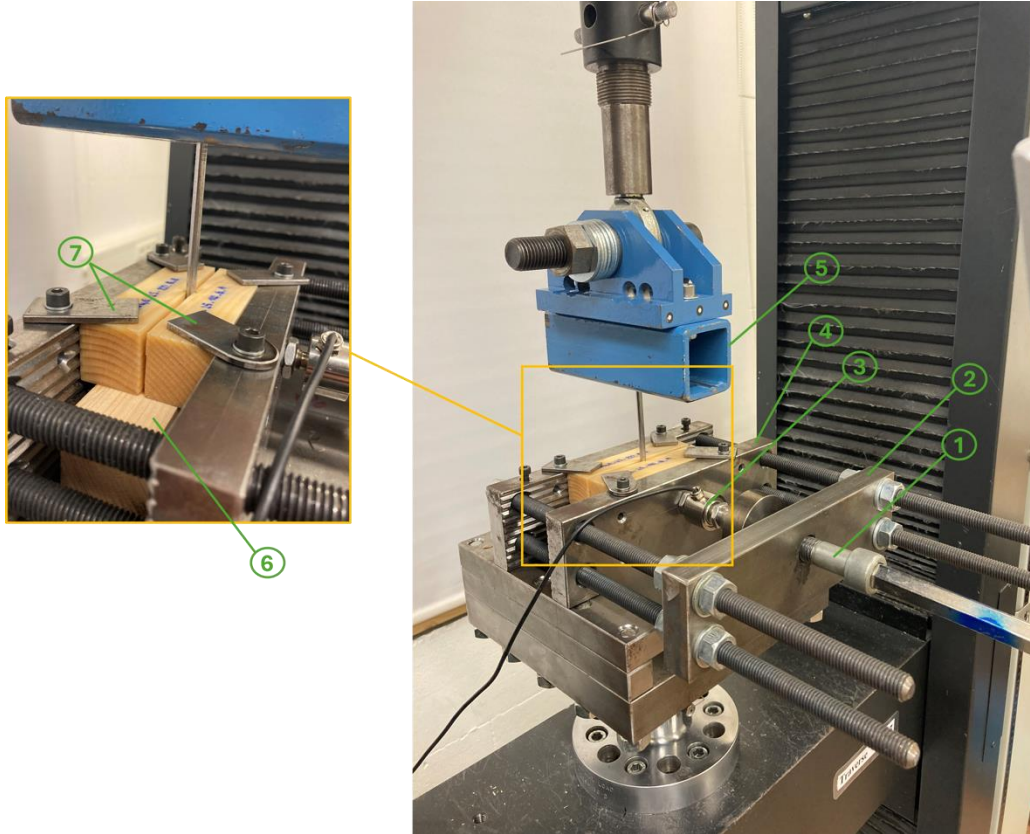


Fig. 1 : Test setup for the determination of coefficients of friction

During a test, different contact loads were applied in stages to reproduce realistic conditions (eq. 1). They were chosen as a percentage  $\alpha$  of the embedment strength of the wood specimen  $f_{h,k}$ , with  $\alpha$  between 0.2 and 1.1,  $d$  the nail's diameter and  $t$  the thickness of the wood specimen.

$$(F_N = \alpha \cdot f_{h,k} \cdot d \cdot t) \quad (1)$$

For each  $F_N$ , a pull-out force was gradually applied until a 5mm displacement of the nail. At the end of a friction test, different COF values were obtained, each corresponding to one contact load. The COF  $\mu$  was determined with equation 2.

$$\left( \mu = \frac{F_f}{2 \cdot F_N} \right) \quad (2)$$

## Results and discussion

Tab. 1 summarizes the results for each parameter configuration. COF between 0.1 and 0.3 were obtained for tests with smooth nails, but COF up to 0.8 were found with profiled nails. The high variability in the results is likely due to differences in density between the tested specimens, as well as the presence of knots. The least dense specimens had darker and deeper nail prints than the denser wood (Fig. 2), and the COF was higher.

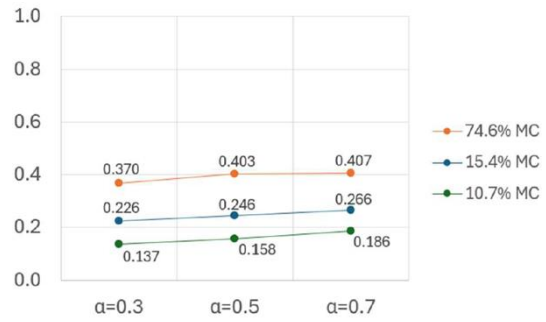
Contact force

In Tab. 1, mean COF values are presented for each contact force. It is yet interesting to examine how  $F_N$  affects the COF. For tests with OSB, no significant influence was observed, which seems consistent. However, for tests with C24 and LVL, for example in Fig. 3, the COF slightly increased with  $F_N$ . This behaviour can be linked to an increase in the size of the print with the contact force despite the pre-pressing of the wood. Indeed, the wood was usually pre-pressed at a load level lower than the maximum contact force applied during a test.



Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Fig. 2 : Example of a C24 specimen after test



Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Fig. 3 : Mean COF between C24 and 6.0 mm nails

Tab. 1 : Results of the test campaign : mean COF and COV

Nail (-)	Wood (-)	$d$ (mm)	$u$ (%)	n (-)	$F_N$ (kN)	$\mu_{mean}$ (-)	COV (%)
Smooth	C24	3.1	10.7	2	0.5-0.8-1.1	0.092	9.7
			15.4	10	0.5-0.8-1.1	0.107	36.0
			73.6	10	0.5-0.8-1.1	0.178	28.3
		4.5	10.7	3	0.6-1.0-1.4	0.132	19.2
			15.4	10	0.6-1.0-1.4	0.167	26.2
			73.6	10	0.6-1.0-1.4	0.272	35.5
		6.0	10.7	2	0.8-1.3-1.8	0.177	20.4
			15.4	10	0.8-1.3-1.8	0.246	70.8
			73.6	10	0.8-1.3-1.8	0.393	22.3
	LVL	3.1	9.9	10	0.6-1.1-1.5-1.9	0.142	18.0
		4.5	9.9	10	1.5-2.5-3.6-4.6	0.344	19.8
		6.0	9.9	10	2.0-3.4-4.7-6.1	0.345	24.5
OSB //	3.1	9.6	10	0.6-0.9-1.3-1.6	0.151	9.6	
	OSB $\perp$	3.1	9.6	10	0.6-0.9-1.3-1.6	0.138	12.3
Profiled	C24	4.0	15.4	5	1.0	0.804	7.4
	OSB	4.0	9.6	5	1.7	0.399	10.8
Corroded	C24	3.1	10.7	2	0.5-0.8-1.1-1.4	0.355	7.5
		4.5	10.7	6	0.5-0.8-1.1-1.4	0.596	4.1

Diameter

No influence of the diameter was expected, since the COF is a coefficient that depends on the surfaces in contact. Nevertheless, the COF increased significantly with nail diameter, nearly doubling between 3.1mm and 6.0mm smooth nails in structural wood. Unlike friction tests with flat surfaces, the radius of curvature is different depending on the diameter, which might result in differences in the stress distribution at the surface of the nail. Yet, it is strange that no influence is visible for tests with OSB specimens.

### *Moisture content*

An increase in the COF with the MC was found. This is consistent with most of literature. But, unlike tests with flat surfaces, a difference in the depth of the prints could be observed depending on the specimen's MC, since wood is more deformable when the MC is higher.

### *Surface roughness*

To characterize the surface of some smooth and corroded nails, a roughness parameter  $R_a$  was measured, which is an arithmetic mean value of their roughness profile.  $R_a$  for smooth nails was about one third of  $R_a$  for corroded nails. Moreover, the COF for smooth nails was about one-quarter of the COF for corroded nails. A higher COF with corroded nails suggests that the rope effect will be more pronounced in a connection where the nails have corroded. Therefore, the lateral load carrying capacity of an old joint could be greater compared to a new one.

### *Friction between wood and profiled nails*

An assumption made in the Extended Model that profiled nails would be governed by friction was also experimentally confirmed. The behaviour at the beginning of the nail's displacement is unclear and might be characterized by a withdrawal strength, like screws. Indeed, the ratio between  $F_f$  and  $F_N$  was not constant. But, for displacements greater than 5.0 to 10 mm, wood fibres are extracted from the wood specimen, and friction was observed.

## **Conclusion and perspectives**

In this study a strong impact of wood heterogeneities and variability on the COF was observed. A numerical study would be interesting to precisely investigate the stress distribution at the wood-to-steel interface.

Knowing the strong impact of some parameters on the COF, such as the nail's roughness or the moisture content of the wood, highlights the importance of having practical and precise COF to obtain a realistic idea of the lateral load-carrying capacity of a connection. Contrary to what is currently used in Eurocode 5, it seems too conservative to neglect wood-to-steel friction in the design of timber connections. Further work would be needed to understand the impact of wood-to-steel friction compared to wood-to-wood friction in the rope effect.

## **Acknowledgements**

We would like to express our thanks to the entire team of the "Bauwerkserhaltung und Holzbau" department at the University of Kassel

## **References**

Ho P (2023) Tragfähigkeit von scherbeanspruchten Stahl-Holz-Verbindungen mit profilierten Nägeln und Schrauben, Master thesis, University of Kassel, 97p

Johansen K. W (1949) Theory of timber connections, International Association for Bridge and Structural Engineering.

## Effet du vieillissement sur la tenue mécanique des joints du bois lamellé-collé

GREFFIER Guilhem, ESPINOSA Luis, EYMA Florent, PERRIN Marianne

Institut Clément Ader (ICA) ; Université de Toulouse ; CNRS, UPS, INSA, ISAE-  
SUPAERO, IMT Mines Albi ; 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France  
[guilhem.greffier@iut-tarbes.fr](mailto:guilhem.greffier@iut-tarbes.fr)

**Mots clefs :** Durabilité ; Bois Lamellé Collé ; Ouvrages d'art ; Cisaillement

### Introduction

Dans le contexte environnemental actuel, l'utilisation du matériau bois apparaît comme un des leviers qui permettra de réduire le bilan carbone du secteur de la construction. En effet, ce secteur d'activité est une des principales sources d'émissions de CO<sub>2</sub> mondiales (Baude et al 2022). Un changement dans l'utilisation des matériaux est donc indispensable pour atteindre l'objectif de neutralité carbone fixé pour 2050 par la Stratégie Nationale Bas Carbone (Cerema 2021, IEA 2019). Afin de répondre à ces exigences l'utilisation de bois dans les ouvrages est une piste de développement intéressante. Pour ce faire, le bois Lamellé Collé LC, constitué de lamelles de bois aboutées et collées entre elles, permet de créer des portées et des sections adaptées à la plupart des ouvrages d'arts de petite longueur (inférieure à 50m) (Glulam Handbook 2018, Le Roy 2013).

A ce jour, le comportement à long terme du bois LC, particulièrement en extérieur, n'est pas suffisamment documenté (Ehrhart et al 2021). Les coefficients de sécurité appliqués au bois lamellé-collé dans l'Eurocode 5 sont issus d'études sur du bois massif (AFNOR 2005a, 2005b, Racher et al. 1996) et ne prennent donc pas en compte la spécificité de ce matériau avec notamment la présence de joints de colle.

Dans ce cadre, des essais actuellement en cours sur le site de l'IUT de Tarbes se concentrent sur l'évolution de la tenue au cisaillement des joints de colle exposés en conditions extérieures. Ces essais proposent également une instrumentation spécifique avec un suivi en continu des sollicitations hygromécaniques. L'objectif de ce travail est donc d'explorer le lien entre les mesures de déformations internes issues des variations d'humidités, mesurées via l'instrumentation des éprouvettes et l'évolution de la résistance au cisaillement des joints de colle.

### Matériel et méthodes

#### *Vieillissement du bois LC*

Une campagne d'essais en extérieur a été initiée en août 2020 pour une durée de 5 ans. 198 éprouvettes en bois LC constituées de trois lamelles de Douglas collées avec de la colle polyuréthane ont été fabriquées. L'essence de Douglas a été choisie car elle fait partie des plus courantes dans l'industrie du lamellé collé pour une utilisation en structure extérieure.

Les éprouvettes mesurent 480 mm de long pour une section de 30x30mm. Ces sections ont été définies selon la norme EN408 (AFNOR 2012). Trois scénarios de vieillissement distincts sont étudiés, 66 éprouvettes sont exposées en conditions extérieures avec une charge de 60 daN en flexion 4 points, 66 éprouvettes sont exposées à l'extérieur sans chargement et 66 éprouvettes sont conservées dans une pièce à température et humidité régulée comme référence. 6



éprouvettes de chaque série sont équipées du système d'instrumentation développé dans notre laboratoire (Uwizeyimana et al 2020) permettant d'avoir un suivi de l'humidité et des déformations dans le bois LC.

### Instrumentation

L'instrumentation des éprouvettes (Fig. 1) consiste en 3 mesures d'humidité par l'intermédiaire de capteurs résistifs de types patches et de deux jauges de déformation disposées de part et d'autre du joint de colle permettant de mesurer les déplacements différentiels entre deux lamelles. L'épaisseur des jauges ne permet pas de les coller sur le même plan transversal de part et d'autre du joint de colle sans risquer de fragiliser l'éprouvette. Elles ont donc été positionnées à la même distance du bord de chaque côté des éprouvettes. Les données récoltées sur site sont transmises par radio pour être exploitées depuis un PC à distance grâce à une interface dédiée (Greffier et al 2022).

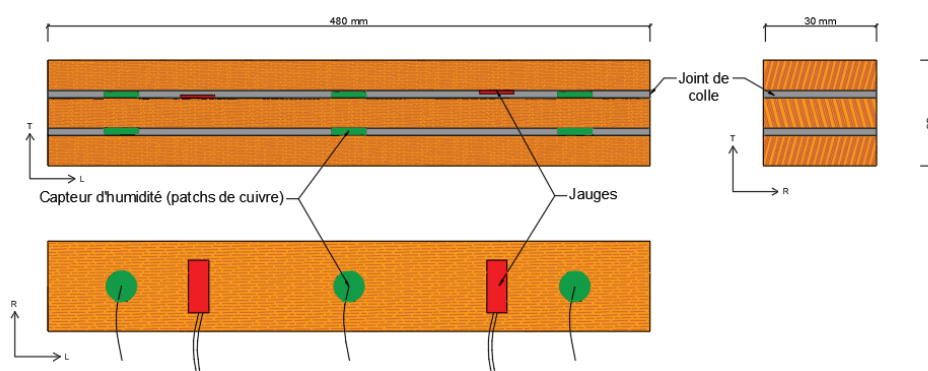


Fig. 1 : Systèmes intégrés de suivi des paramètres de vieillissement du bois lamellé collé

### Essais de cisaillement

Tous les 6 mois, 6 éprouvettes chargées et 6 éprouvettes non-chargées sont caractérisées. 5 éprouvettes de chaque cas sont testées en flexion et une éprouvette est débitée en 14 échantillons cubiques de 30 mm de côté. Le joint de colle supérieur de ces échantillons est testé en cisaillement comme illustré sur la Fig. 2. Les essais de cisaillement sur le joint de colle sont réalisés en suivant les recommandations de l'annexe D de la norme NF 14080 (AFNOR 2013).

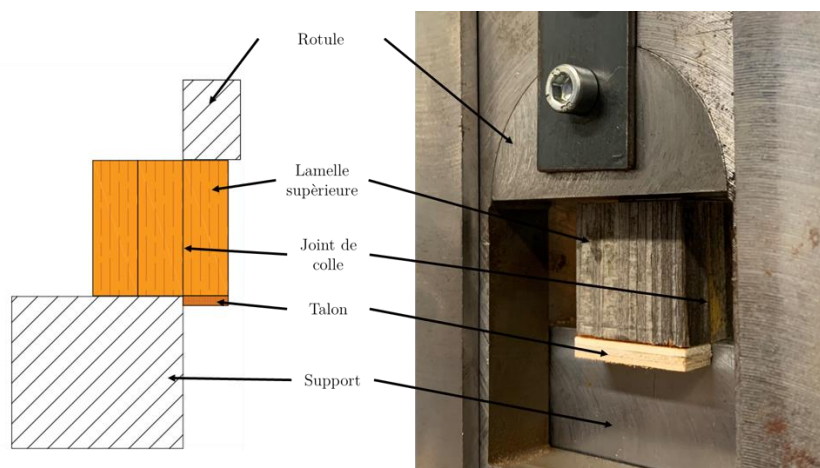


Fig. 2 : Dispositif d'essais en cisaillement

L'effort et le déplacement sont mesurés via la cellule de charge et le déplacement de la traverse de la machine d'essais. Le calcul de la résistance au cisaillement du joint de colle est déterminé par l'équation 1 :

$$\sigma_v = \frac{Fv_{max}}{A} \quad (1)$$

avec :

- $\sigma_v$  : la résistance au cisaillement du joint de colle (en MPa) ;
- $Fv_{max}$  : la charge à la rupture (en N) ;
- $A$  : la surface de cisaillement (en mm<sup>2</sup>).

Le taux de délamination, qui est un outil couramment utilisé pour évaluer la tenue d'un joint de colle aux sollicitations hygromécaniques dans le bois, est également mesuré selon les exigences de la NF EN 14080 (AFNOR 2013). Le taux de délamination d'un joint de colle correspond au rapport entre la longueur de joint délaminée et la longueur totale du joint de colle sur les deux faces de l'échantillon d'essai. Il est calculé comme suit (Equation 2) :

$$Délam = \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,joint\ de\ collage}} \cdot 100 \quad (2)$$

avec :

- $l_{tot,delam}$  : la longueur de joint délaminé sur les deux faces en bout de l'échantillon (en mm) ;
- $l_{tot,joint\ de\ collage}$  : la longueur totale de joint sur les deux faces en bout de l'échantillon (en mm) ;
- $Délam$  : le taux de délamination (en %).

## Résultats

### Evolution des déformations différentielles

Le suivi des déformations mesurées par l'intermédiaire des jauges positionnées de part et d'autre des joints de colle montre des déformations équivalentes entre les jauges pour les premiers mois de suivi. Nous observons ensuite deux principaux cas de figures pour l'évolution des déformations différentielles.

Le premier cas de figure a été constaté sur 3 éprouvettes, sur lesquelles on peut observer un accroissement des déformations différentielles lors des phases d'humidification avec la courbe verte au-dessus de la courbe orange dans les phases humides (cercles verts sur la Fig. 3). Lors des phases de séchages (cercles rouges sur la Fig. 3) les déformations différentielles reviennent à leur état initial.

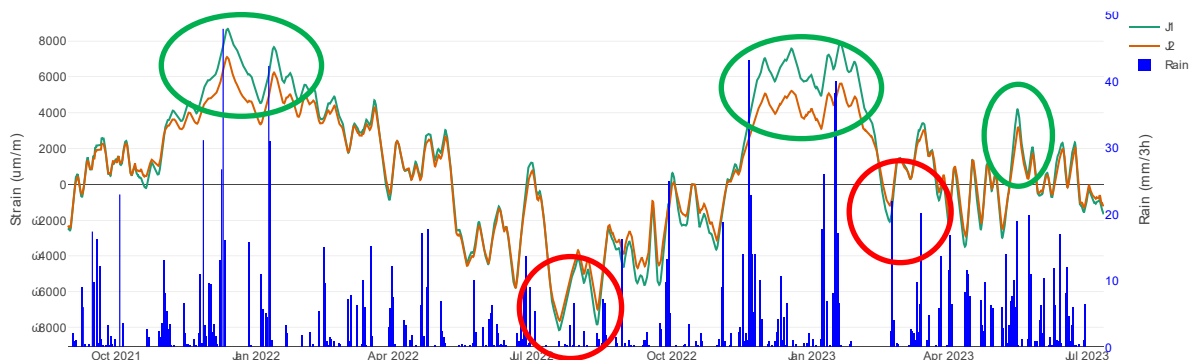


Fig. 3 : Evolution de la déformation de la lamelle supérieure (J1, en vert) et de la lamelle intermédiaire (J2, en orange) sur 20 mois (Epreuve 1)

Pour le second cas de figure, nous constatons là encore un accroissement des déformations différentielles lors des phases d'humidification. Cependant, il semble que la répétition des cycles de retrait/gonflement entraîne un déplacement irréversible d'une lamelle par rapport à l'autre. Sur la Fig. 4 (repère A), lors du premier cycle saisonnier, entre août 2021 et août 2022, le comportement des deux jauges est analogue à celui constaté pour le premier cas de figure.

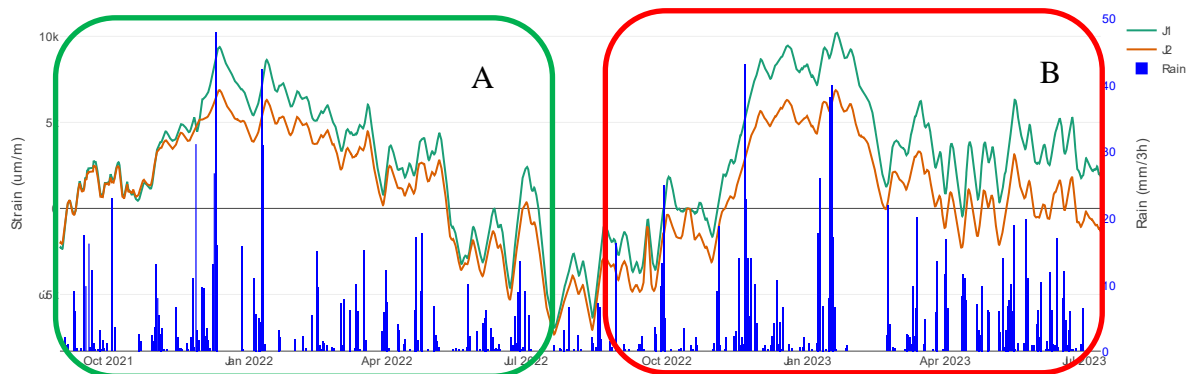


Fig. 4 : Evolution de la déformation de la lamelle supérieure et de la lamelle intermédiaire: Jauge supérieure J1 en vert, Jauge inférieure J2 en orange (Epreuve 2)

En revanche, lors du deuxième cycle saisonnier, les déformations différentielles observées lors de la phase d'humidification, ne décroissent pas lors de la phase de séchage (Fig. 4 repère B). Nous avons donc, pour certaines éprouvettes, des comportements spécifiques d'une lamelle à l'autre. Une des conséquences de ce phénomène pourrait être un endommagement du joint de colle.

#### Evolution des taux de délamination

L'analyse des taux de délamination en fonction des conditions de vieillissement met en évidence l'apparition de délaminations dès 6 mois en extérieur. La Fig. 5 illustre les délaminations observées sur une éprouvette après un an d'exposition en extérieur. Nous constatons dans ce cas des délaminations sur environ 2 mm de profondeur sur une seule face du joint supérieur et inférieur.

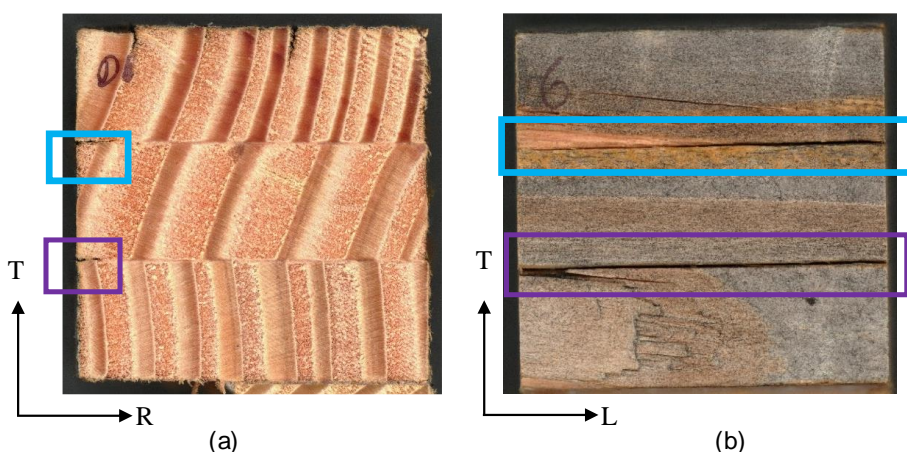


Fig. 5 : Délaminations sur des échantillons d'une éprouvette après 1 an d'exposition en extérieur sans chargement : (a) : plan TR ; (b) : plan TL

Ces taux de délamination peuvent être assez hétérogènes sur les échantillons issus d'une même éprouvette. L'évolution des taux de délamination moyen en fonction de la durée d'exposition en extérieur ne met pas en évidence de tendance remarquable et les taux de délaminations restent

de manière générale faibles avec un taux de délamination moyen mesuré à 5.5 % pour l'éprouvette exposée 12 mois en extérieur non chargée qui est l'éprouvette la plus délaminée.

### Evolution de la résistance en cisaillement

Les résultats des essais mécaniques en cisaillement montrent une diminution conséquente de la résistance en cisaillement dès les 6 premiers mois d'exposition en extérieur, avec une diminution moyenne de 21 % pour la série « 6 mois » et de 26 % pour la série « 6 mois chargé ». Si l'on s'intéresse maintenant aux effets à plus long-terme (Fig. 6), les propriétés ne montrent pas de tendance d'évolution significative. Seuls les échantillons exposés 24 mois sans chargement présentent des résistances de cisaillement significativement plus faibles que les autres échantillons exposés en extérieur.

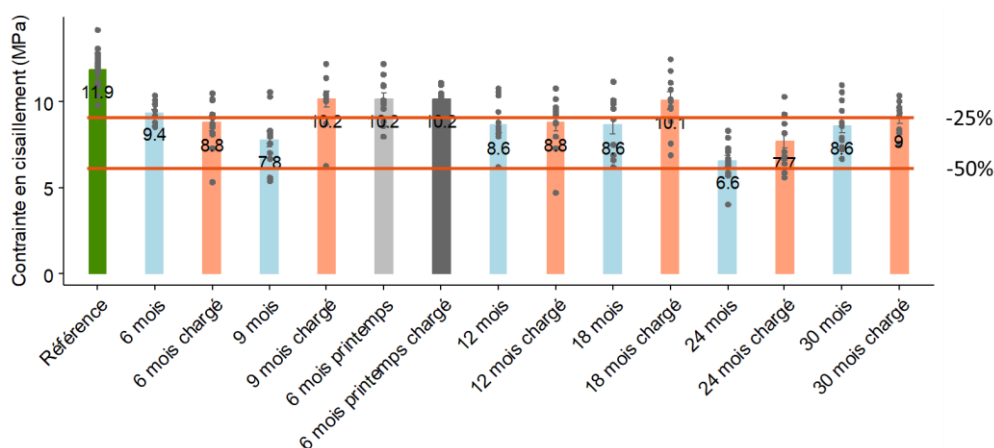


Fig. 6 : Evolution de la résistance en cisaillement après 24 mois d'essais. Les seuils (en rouge) sont déterminés en prenant la valeur moyenne de résistance de référence à 100 %

Une particularité de ces résultats concerne l'apparition d'échantillons avec des propriétés très faibles, sous le seuil des 50 % (échantillons sur la Fig. 6 où la contrainte est inférieure à 6 MPa). Nous avons donc une hétérogénéité qui apparaît avec le vieillissement qui se traduit par des zones de faible résistance en cisaillement au sein des éprouvettes.

### Conclusion

Ces résultats mettent en évidence l'apparition de déformations différentielles entre les lamelles de part et d'autre des joints de colle. Ces déformations différentielles sont à l'origine de sollicitations mécaniques à l'interface collée. Ces sollicitations mécaniques semblent être à l'origine de l'apparition de délaminations cependant celles-ci restent limitées à quelques millimètres de profondeur au niveau des faces extérieures. L'évolution des résistances au cisaillement met, quant à elle, en évidence des dégradations importantes avec, dès 6 mois, des éprouvettes avec une diminution moyenne de la résistance au cisaillement de 25 % et localement des échantillons avec des résistances 50 % plus faibles que les échantillons de référence. Le taux de délamination semble donc être un indicateur insuffisant pour attester de la dégradation mécanique d'un joint de colle.

L'évolution de la résistance au cisaillement des joints de colle montre que d'autres mécanismes de dégradations que les délaminations sont à l'origine d'une dégradation des propriétés mécaniques de l'interface collée.

Les observations macro et microscopiques réalisées à ce jour ne nous ont cependant pas permis d'identifier le mécanisme de dégradation à l'origine de cette dégradation. Celle-ci pouvant être

associée à un phénomène de fatigue lié aux sollicitations hygromécaniques ou à une dégradation chimique des joints de colle par exemple.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'agglomération de Tarbes Lourdes Pyrénées, L'IUT de Tarbes et la Région Occitanie pour leur support financier, ainsi qu'Emmanuel LAUGT pour son soutien technique et ses précieux conseils dans le cadre du développement du système de suivi.

## Références

AFNOR (2005a) NF EN 1995-1-1 : Eurocode 5—Conception et calcul des structures en bois—Partie 1-1 : Généralités—Règles communes et règles pour les bâtiments.

AFNOR (2005b) NF EN 1995-2 : Eurocode 5—Conception et calcul des structures bois—Partie 2 : Ponts.

AFNOR. (2012) NF EN 408+A1, Structures en bois—Bois de structure et bois lamellé-collé—Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

AFNOR. (2013) NF EN 14080 : Structures en bois—Bois lamellé-collé et bois massif reconstitué—Exigences.

Baude M, Colin A, Calipel C, Duvernoy J, Foussard A (2022, Chiffres clés du climat—France, Europe et Monde. ISSN : 2555-7580 Cerema (2021) Réduire l'impact carbone des bâtiments, Le p'tit essentiel, 12 p.

Ehrhart T, Grönquist P, Schilling S, Steiger R, Frangi A (2021) Mechanical properties of European beech glulam after 32 years in a service class 2 environment. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000506091>

Glulam Handbook (2018) Volume 1—Histoire et développement du bois lamellé. handbook.

Greffier G, Perrin M, Eyma F, Espinosa L, Uwizeyimana P (2022) Structural Health Monitoring of glulam infrastructures with non-destructive embedded sensors, Dans The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering (Vol. 27). Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.58286/27293>

Hill CAS (2019) The Environmental Consequences Concerning the Use of Timber in the Built Environment, *Frontiers in Built Environment*, Volume 5.

Hurmekoski E (2017) How can wood construction reduce environmental degradation? European Forest Institute.

IEA (2019) Global Status Report for Buildings and Construction 2019 – Analysis. IEA.

Le Roy R (2013) Ouvrages d'art en bois—Perspectives de développement en France, Présentation aux 2èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du bois

Racher P, Biger JP, Rouger F, Sagot G, Vidon G (1996) Structures en bois aux états limites : Introduction à l'Eurocode 5, STEP 1. Matériaux et bases de calcul. Eyrolles.

Uwizeyimana P, Perrin M, Eyma F (2020) Moisture monitoring in glulam timber structures with embedded resistive sensors: Study of influence parameters, *Wood Science and Technology*, 54(6), 1463-1478. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01228-8>

## **Etude de la durabilité hygromécanique de panneaux isolants sous conditions tropicales par techniques de mesure de champs**

MAHAMAT SALEH Atteib<sup>1</sup>, DUPRE Jean-Christophe<sup>1</sup>, BOSSU Julie<sup>2</sup>,  
DOUMALIN Pascal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Equipe PEM, Institut PPRIME, UPR 3346, Université de Poitiers-CNRS

<sup>2</sup>UMR EcoFoG, INRA, CNRS, Cirad, AgroParisTech, Université des Antilles,  
Université de Guyane

[atteib.mahamat.saleh.cheikhadine@univ-poitiers.fr](mailto:atteib.mahamat.saleh.cheikhadine@univ-poitiers.fr) ; [pascal.doumalin@univ-poitiers.fr](mailto:pascal.doumalin@univ-poitiers.fr) ;  
[jean.christophe.dupre@univ-poitiers.fr](mailto:jean.christophe.dupre@univ-poitiers.fr) ; [julie.bossu@cnrs.fr](mailto:julie.bossu@cnrs.fr)

**Mots clefs :** Panneaux isolants ; fibres ; mesure optique ; comportement hygromécanique ; durabilité

### **Contexte et objectifs**

Ce travail s'inscrit dans le projet de recherche ANR PANTHER<sup>2</sup>Guyane, visant à développer des bio-isolants pour le bâtiment, adaptés aux conditions extrêmes de la Guyane à partir des ressources bois résiduelles locales. En utilisant le feutrage des fibres de bois tropicaux, l'objectif est de produire des panneaux isolants semi-rigides, peu coûteux et performants thermiquement, mécaniquement, face au feu et aux attaques biologiques. Différentes variétés de bois seront étudiées. Ce travail se concentre sur l'évaluation du comportement hygromécanique des panneaux fibreux dans les conditions tropicales de la Guyane. En effet, il est essentiel de connaître et quantifier les variations géométriques d'un panneau (affaissement sous son propre poids, gonflement...) en conditions d'utilisation, pouvant entraîner une perte de performance d'isolation. Les études seront menées à différentes échelles : à l'échelle microscopique, afin d'établir le lien entre la microstructure et la résistance mécanique, à l'échelle mésoscopique sur des portions de panneaux pour établir le lien entre taux d'humidité et durabilité mécanique, et à l'échelle du panneau en conditions réelles dans des répliques d'habitation. La première étape de ce travail, présentée ici, correspond à l'étude mésoscopique, et plus particulièrement à la présentation du banc de mesure ainsi que des premiers résultats.

### **Matériels et méthodes**

Un dispositif expérimental a été conçu pour étudier le comportement hygromécanique des panneaux en mesurant leurs variations géométriques et de masse liées aux cycles d'humidité et de température. Il est composé d'une enceinte climatique permettant de réguler la température et l'humidité, de balances pour suivre les évolutions des masses des échantillons, de deux caméras et d'un éclairage pour observer la géométrie des échantillons (Fig. 1). Les images enregistrées sont analysées par corrélation d'images afin d'obtenir les champs de déformations à la surface de la tranche. Le contraste naturel des fibres est utilisé comme marqueurs. Ces essais ont été menés en exposant des portions de panneau de 100x100mm<sup>2</sup> à des variations d'hygrométrie et de température représentatives des conditions rencontrées en Guyane durant une journée, allant de 30 à 95% d'humidité relative et de 25 à 50°C de température. Trois cycles ont été imposés afin de voir l'évolution sur plusieurs jours. 11 modalités de panneaux ont été testées, constituées de différentes fibres de bois tropicaux incorporant ou non des écorces et de pin maritime pour comparaison (Yayamadou avec et sans écorce, Grignon, Simarouba, Bois canon avec et sans écorce, Angélique, Bagasse avec et sans écorce, Maho, Pin). Les déformations globales de la tranche sont obtenues à partir des quatre zones de corrélation

carrées (de dimension 4mm) placés aux coins de la tranche de l'échantillon. Pour les déformations locales, une grille de 60x10 zones de corrélation de même taille ont été prises en compte. Les images sont acquises toutes les 5 minutes.

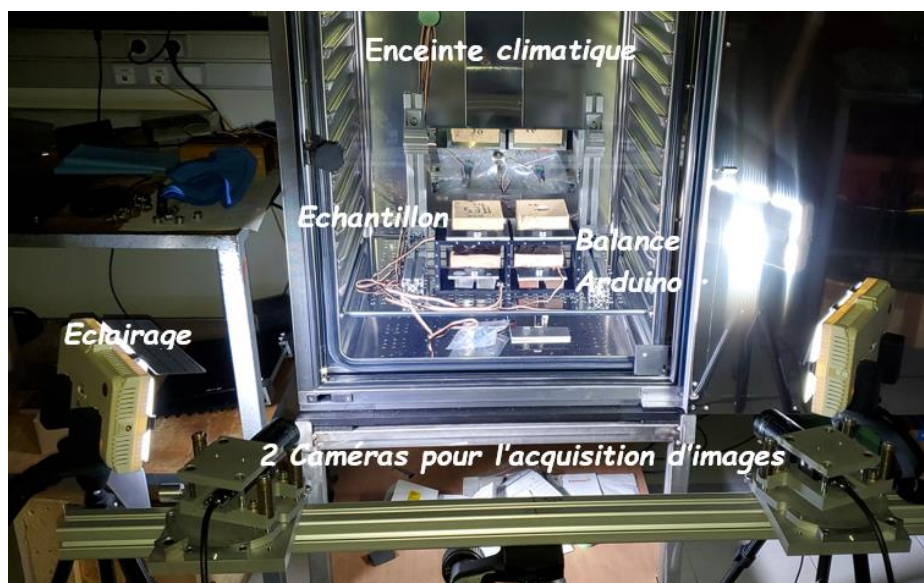


Fig. 1 : Dispositif expérimental

## Premiers résultats

### *Exemple de comportement obtenu avec le Simarouba*

#### Variations de masse

La Fig. 2 présente les résultats des variations de masse pour l'échantillon Simarouba (S5B). Les variations de masse observées suivent les évolutions du cycle hygrothermique : lorsque la température diminue et l'humidité relative augmente, la masse de l'échantillon augmente jusqu'à 2.4g pour le dernier cycle. Lors de l'augmentation de la température et de la baisse de l'humidité relative, on observe un comportement inverse. On peut noter un retard temporel, d'environ une heure, dans l'évolution de la masse par rapport à l'humidité relative et la température due au temps de diffusion de l'humidité dans le matériau ainsi qu'un léger accroissement de la masse de 0.2g durant les trois cycles.

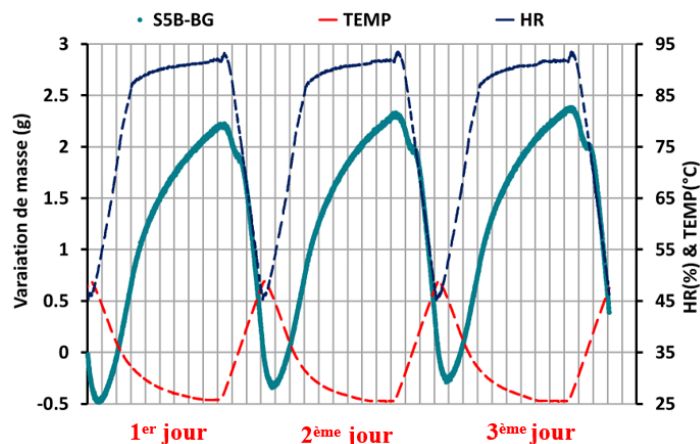


Fig. 2 : Variations de masse (courbe verte) pour l'échantillon Simarouba en fonction de l'humidité relative (courbe bleue) et la température (courbe rouge) pour 3 cycles de 24 heures

### Déformations moyenne globale

La Fig. 3 présente l'évolution de la déformation globale verticale pour l'échantillon de Simarouba (S5B). Comme la masse, elle évolue en fonction du cycle hygrothermique : lorsque la température diminue et l'humidité relative augmente, le matériau gonfle avec une déformation verticale de l'ordre de 2.5% au maximum. En revanche, les déformations horizontales et de cisaillement sont négligeables. On observe un léger accroissement de la déformation de 0.1% entre les trois cycles.

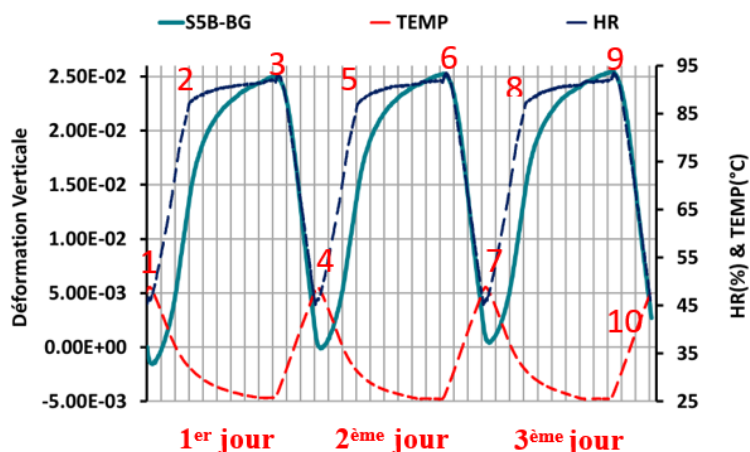


Fig. 3 : Déformation moyenne verticale (courbe verte) pour l'échantillon de Simarouba en fonction de l'humidité relative (courbe bleue) et la température (courbe rouge) pour 3 cycles de 24 heures

### Déformations locales

Les déformations locales verticales sont représentées sur la Fig. 4 pour différents états hygrothermiques correspondants aux débuts ou fins de cycles (états 4, 7 et 10 sur la fig. 3), à la fin de la montée d'humidité relative (états 2, 5, 8 sur la fig. 3) et à la fin du palier à 95% (états 3, 6, 9 sur la fig. 3). On observe pour tous les états une hétérogénéité des déformations sur la tranche qui se conserve durant les cycles et entre les cycles. Le gonflement de l'échantillon est alors hétérogène, certainement dû à l'hétérogénéité microstructurale. Seules les valeurs extrêmes évoluent dans un cycle allant de 0.6% à 4%. On peut noter aussi une légère augmentation de ces extremums entre les cycles.

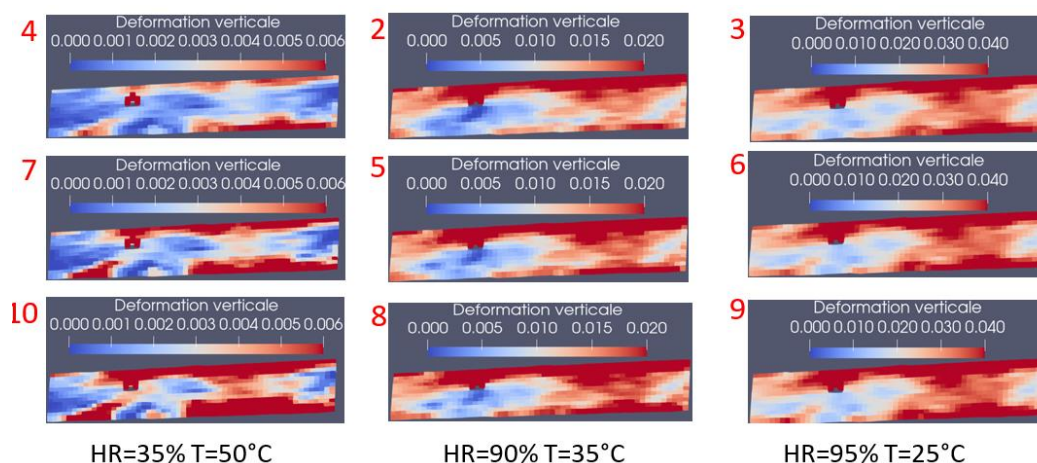


Fig 4 : Déformations locales verticales pour l'échantillon de Simarouba pour différents états hygrothermiques (Fig. 3) et pour 3 cycles de 24 heures

### Comparaison des différents échantillons

Pour comparer les différentes modalités entre elles, une analyse associant les déformations globales, les quartiles et médianes calculés sur les champs de déformations locales a été menée



pour l'état hygrothermique correspondant à la température minimale (25°C) et l'humidité relative maximale (95%) (état 9 sur la Fig. 3). Cette analyse a permis de comparer le niveau d'hétérogénéité de déformation des 11 modalités (Fig. 5). Plus la différence entre les quartiles est élevée, plus l'échantillon a un comportement hétérogène. Ces premiers essais montrent que le Simarouba et le Yayamadou sont ceux qui ont un comportement le plus hétérogène à l'inverse du Grignon et de l'Angélique. En comparant les valeurs maximales des variations de masse et de déformations globales (état 9 sur la Fig. 3), on constate Fig. 6 qu'il n'y a pas de corrélation entre ces deux grandeurs pour ces premiers essais.

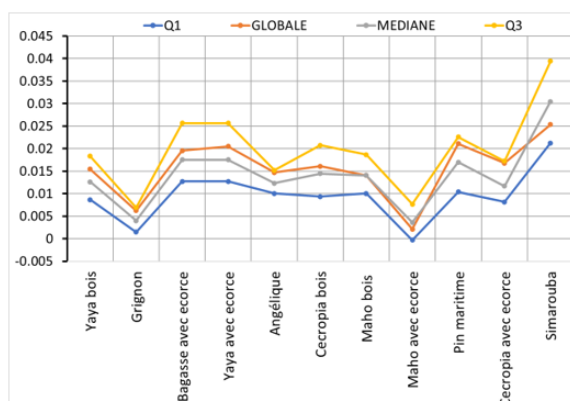


Fig 5 : Analyse statistique des déformations

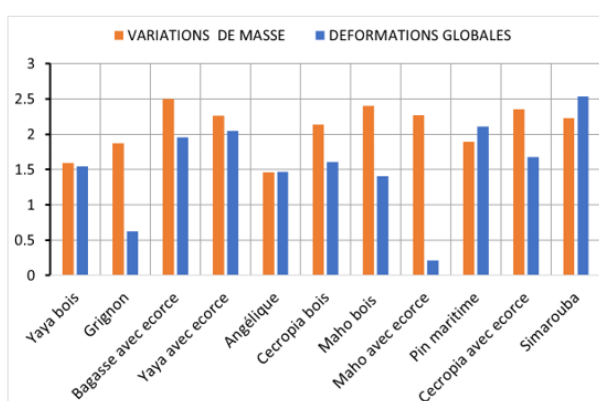


Fig 6 : Comparaison variations de masses/déformations

## Conclusions et perspectives

Un banc d'essai a été développé pour analyser le comportement hygromécanique des panneaux isolants à base de fibres de bois tropicaux en recréant des cycles climatiques de 24 heures similaires à ceux rencontrés en Guyane. Les variations de masse et les déformations ont été mesurées au cours du temps et suivent logiquement les variations d'humidité relative et de température. Les valeurs maximales sont atteintes lors des pics d'humidité relative avec une température faible. Les déformations sur la longueur et de cisaillement sont négligeables. Une hétérogénéité des déformations sur les tranches des échantillons a été relevée, de l'ordre de 4%. Aucune corrélation n'a été trouvée entre l'amplitude des variations de masse et celle des déformations. Pour valider ces premiers résultats, de nouveaux essais similaires sont en cours. Par ailleurs, une campagne d'essais pour mesurer les déformations de la surface supérieure des échantillons sera menée pour observer plus globalement le gonflement des échantillons.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR (Agence nationale de la recherche) pour son soutien financier au projet PANTHER2 n° ANR-22-CE43-0019.

## Influence de la masse volumique sur le comportement avec l'eau de 50 essences de bois tropicaux Africains

MIKALA MOUENDOU Marlain Stevy<sup>1,2,4</sup>, SAFOU TCHIAMA Rodrigue<sup>2,3</sup>,  
DUMARCAY Stéphane<sup>1</sup>, GERARDIN Philippe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LERMAB, Faculté des Sciences et Technologies Université de Lorraine Bld des Aiguillettes, BP 70239 - F 54506 VANDOEUVRE les NANCY cédex, France

<sup>2</sup>LASNOM, Unité de Recherche en Chimie (URChi), Université des Sciences et Techniques de Masuku. BP. 941 Franceville, Gabon.

<sup>3</sup>LaReVa Bois, GTR N°3/USTM, BP 3989. Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET) Libreville, Gabon

<sup>4</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF). PB.3960 Libreville, Gabon

[marlain.mikala-mouendou@univ-lorraine.fr](mailto:marlain.mikala-mouendou@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** masse volumique ; propriétés physiques ; bois tropicaux africains ; imprégnabilité ; retrait volumique ; gonflement ; corrélation

### Contexte et objectifs

Cette étude analyse comment la masse volumique influence certaines propriétés physiques de 50 espèces de bois tropicaux africains lorsqu'ils interagissent avec l'eau. Les objectifs sont de comprendre les relations entre la masse volumique (mV) et d'autres paramètres comme le taux d'humidité du bois sec à l'air (H0), le taux d'humidité du bois saturé d'eau (H1), le gonflement (G) et l'imprégnabilité du bois (gain de masse, GM).

### Matériel et méthodes

Les données incluent 50 essences de bois tropicaux africains provenant de ATOUT BOIS Echantillons. Des échantillons de  $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ , avec trois répétitions pour chacune des 50 essences, ont été séchés à  $103^\circ\text{C}$  pendant 24 heures après avoir mesuré leur masse initiale  $m_0$  (masse à l'état sec à l'air libre). Après séchage, une masse  $m_1$  a été mesurée. Les échantillons ont ensuite été saturés sous vide dans de l'eau distillée, et la masse humide ( $m_2$ ) a été mesurée après 24 heures. Ce cycle a été répété trois fois pour calculer la densité, le gonflement, l'humidité et le gain de masse. Des tests statistiques ont été réalisés, notamment une ANOVA et un test de Kruskal-Wallis a été utilisé lorsque les hypothèses de normalité n'étaient pas respectées. Des tests de corrélation de Spearman ont été effectués pour explorer les relations entre mV et les autres paramètres physiques.

### Résultats et discussion

Les résultats ont montré que les masses volumiques les plus élevées ont été observées chez *Letestua durissima*, *Lophira alata* et *Coula edulis* avec respectivement  $1083,56 \pm 12,64 \text{ kg/m}^3$ ,  $1067,86 \pm 8,98 \text{ kg/m}^3$  et  $996,90 \pm 8,28 \text{ kg/m}^3$ , tandis que les plus faibles ont été observées chez *Aucoumea klaineana*, *Pycnanthus angolensis* et *Ricinodendron heudelotii* dont les valeurs sont respectivement  $454,97 \pm 5,94 \text{ kg/m}^3$ ,  $448,37 \pm 2,89 \text{ kg/m}^3$  et  $244,82 \pm 11,36 \text{ kg/m}^3$ . Les résultats révèlent en plus, des corrélations significatives entre la masse volumique et les propriétés physiques mesurées (Tab. 1). Une corrélation positive modérée a été trouvée entre la masse volumique et le taux d'humidité du bois sec à l'air, indiquant que les bois plus denses retiennent plus d'humidité. En revanche, une forte corrélation négative a été observée avec le taux

d'humidité du bois saturé, suggérant que les bois plus denses absorbent moins d'eau. Le gonflement présente une corrélation positive faible à modérée avec la masse volumique, tandis que l'imprégnabilité du bois (gain de masse) montre une forte corrélation négative (Fig. 2). Certaines de ces observations ont été faites par plusieurs auteurs tels que Yamamoto et Hong (1994), Jankowska (2018), Ojo et al (2022), et Ella Nkogo (2024).

Tab. 1 : Résultats de la matrice de corrélation complète

	mV	H0	H1	G	GM
mV	1	0,679	-0,864	0,409	-0,759
H0	0,679	1	-0,597	0,375	-0,595
H1	-0,864	-0,597	1	-0,126	0,882
G	0,409	0,375	-0,126	1	-0,190
GM	-0,759	-0,595	0,882	-0,190	1

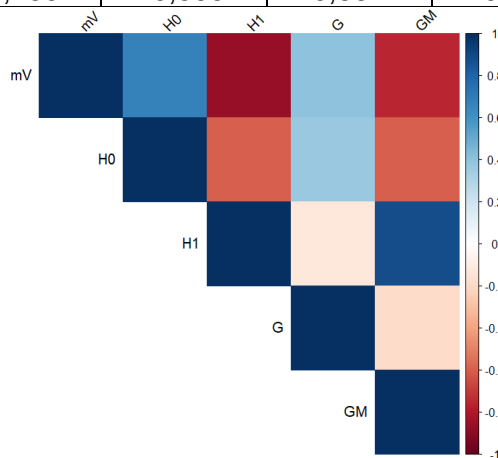


Fig. 1 : Visualisation de la matrice de corrélation

## Conclusion et perspectives

Les résultats confirment que la masse volumique influence fortement les propriétés physiques du bois, telles que l'humidité et l'imprégnabilité. Ces relations sont essentielles pour comprendre le comportement des bois tropicaux en fonction de leur densité et pour leur utilisation dans diverses applications. Des études supplémentaires sur la durabilité des bois en fonction de leur masse volumique sont envisagées.

## Remerciements

Source de financement : Agence Nationales des Bourses du Gabon (ANBG)

## Références

Yamamoto K, Hong L (1994) A Laboratory Method for Predicting the Durability of Tropical Hardwoods. *JARQ-Japan Agricultural Research Quarterly* 28 (4): 268–75.

Jankowska A (2018) Assessment of Sorptive Properties of Selected Tropical Wood Species. *DRVNA INDUSTRIJA* 69 (1): 35–42.

Ojo AR, Oluwaseun Ogotuga S., Olanipekun Aguda L. (2022) Correlation between Dry Density and Shrinkage in Eight Tropical Hardwood Species: Zveza Med Gostoto in Krčenjem Lesa Osmih Tropskih Vrst. *Les/Wood* 71 (2): 31–44.

Ella Nkogo LF (2024) Etude multicritère des facteurs prédisant la dureté du bois de quelques essences. *Éléments des travaux de thèse (en cours)*.

## Les mycocomposites au service de l'allègement de structure béton : Mycodalle

LANGLOIS Paul<sup>1</sup>, ANTOINE Marie-Laure<sup>1,2</sup>, PERRIN Christelle<sup>1</sup>, LALLEMAND Julien<sup>1</sup>, BESSERER Arnaud<sup>1</sup>, BROSSE Nicolas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, LERMAB, France

<sup>2</sup>ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Epinal, France

[paul.langlois3@etu.univ-lorraine.fr](mailto:paul.langlois3@etu.univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Mycocomposite ; Béton ; Noyau ; Bois ; Recyclage

### Contexte

Le changement climatique est une problématique mondiale et il est en partie dû à de nombreux secteurs qui ont une activité à forte émission en carbone. Le secteur du bâtiment est le plus important (Calvin et al 2023) avec notamment la production de liant pour le ciment. Pour diminuer fortement l'émission de CO<sub>2</sub> dans ce secteur, l'utilisation du ciment et donc du béton doit être revue à la baisse. Pour cela, l'Europe incite fortement par des appels à projet ou des sanctions, l'utilisation de matériaux biosourcés qui permet de diminuer l'utilisation du ciment et de piéger le carbone contenu dans les matériaux biosourcés au sein des bâtiments. C'est dans ce sens que l'entreprise Modulatio apporte une solution innovante. L'idée est de produire les dalles béton avec un noyau en polystyrène. Cela va avoir pour avantage de diminuer grandement la quantité de béton utilisé et participer à l'allègement de la structure. L'inconvénient ici est qu'on a remplacé le béton par un matériau d'origine pétrolier. Les mycocomposites constituent des matériaux innovants et durables avec de nombreuses applications potentielles (Cerimi et al 2019). La croissance d'un champignon filamenteux sur un substrat lignocellulosique donne une matrice qui est la composante du mycocomposite, matrice présentant des caractéristiques attractives dans le secteur du bâtiment. Ce matériau apparaît comme une solution de substitution au polystyrène utilisé par Modulatio. Cette substitution fait l'objet du projet de recherche présenté ici.

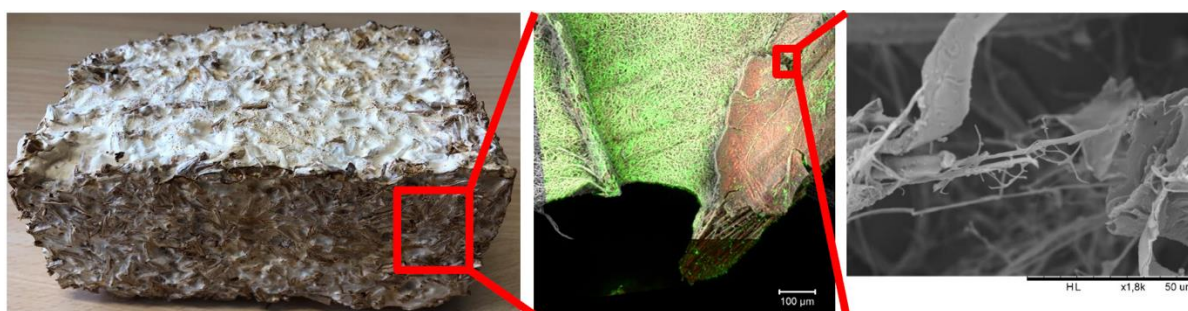


Fig. 1 : Mycocomposite Hêtre/ *T. versicolor* caractérisé à différentes échelles. De gauche à droite : le composite obtenu (15\*9\*6cm), caractérisation de la colonisation par CLEM (CLSM/SEM) où le champignon apparaît en vert et le bois en rouge et détail au SEM d'hyphes de champignon assurant la cohésion entre 2 particules de bois.

### Objectifs

Le but de ce projet de recherche en collaboration avec Modulatio est de proposer une solution de substitution au polystyrène expansé actuellement utilisé dans la production de dalles béton allégées en utilisant un composite bois/champignon (mycocomposite). Le projet comporte donc un volet fondamental qui consistera notamment à étudier la croissance et les réponses

morphologiques et physiologiques du champignon à différentes biomasses bois afin d'optimiser les propriétés du matériau final à son usage. Le volet appliqué sera réalisé en partenariat avec l'entreprise Modulatio et ses partenaires dans la construction pour la faisabilité des produits proposés sur chantier.

### **Matériel, méthode et résultats attendus**

Dans cette partie, ne seront présentés que les travaux de recherches envisagés pour les premiers mois du projet de recherche.

Les mycocomposite seront produits en suivant la méthode utilisée dans le cadre du projet Profex (Elsacker et al 2019, Aguilar et al 2024) L'optimisation de la croissance du mycocomposite est un élément important, car nous voulons produire le mycocomposite le moins dense possible, ce dernier substituera le polystyrène qui a une masse volumique très faible.

Les mycocomposites seront produits en cylindre afin d'y couler du béton au centre pour étudier dans un premier temps la bonne prise du béton (problématique de l'absorption de l'eau présente dans le mortier ou de la dissolution de sucre présent à la surface du mycocomposite). Une analyse de contact entre le béton et le mycocomposite sera effectuée au sein de l'Institut Jean Lamour. Dans un premier temps une analyse mécanique sera effectuée pour caractériser l'interaction entre le mycocomposite et le béton, dans un second temps nous observerons au microscope à balayage électronique (MEB)

En parallèle, la croissance d'un mycocomposite dans un moule représentant à l'échelle 20x20cm du mur final sera étudié afin de déterminer et de solutionner les différentes problématiques que le processus peut rencontrer (aération, humidité, stérilité d'un milieu aussi grand, bonne prise de la forme par le mycocomposite, démoulage du mycocomposite, ...)

### **Conclusion et perspective**

L'objectif final, c'est une dalle de béton de 2x1m de 20 cm d'épaisseur dont on veut produire le noyau et que la solution permette de couler la dalle sur chantier. Les problématiques autour de la production du mycocomposite de cette envergure sont nombreuses et vont demander beaucoup de recherches en amont. C'est donc en augmentant progressivement l'échelle qu'on pourra arriver à une solution pouvant être mise en place sur chantier.

### **Références**

Calvin K, Dagupta D, Leprince-Ringuet N, Péan C (2023) IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Cerimi K, Can Akkaya K, Pohl C, Schmidt B, Neubauer P (2019) Fungi as source for new bio-based materials: a patent review. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>

Elsacker E, Vandeloock S, Brancart J, Peeters E De Laet L (2019) Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>

Aguilar K, Figel L, Saker S, Soufflet L, Brosse N, Besserer A (2024) Steam Explosion: A Booster for Fungal Growth in a Myco-composite. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1021/acssuschemeng.4c03099>

## MDF wood fibre strength after several recycling cycles

LEBRETON Flore<sup>1</sup>, IRLE Mark<sup>1</sup>, LAGARDE Hélène<sup>1</sup>, BELLONCLE Christophe<sup>1</sup>,  
BUCHNER Julia<sup>2</sup>, LECOURT Michael<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Innovation Matériau Bois HABitat (LIMBHA), École Supérieure du Bois (ESB)

<sup>2</sup>Plant Development & Electron Microscopy, Biocenter LMU Munich, Planegg-Martinsried

<sup>3</sup>Institut FCBA (Forêt Cellulose Bois-Construction Ameublement), Grenoble

[flore.lebreton@esb-campus.fr](mailto:flore.lebreton@esb-campus.fr)

**Key words:** recovered wood; recycling; wood fibre; MDF; tensile tests; fibre strength; zero-span

### Context and objectives

Medium Density Fibreboard (MDF) is a “*panel material with a nominal thickness of 1.5mm or greater, manufactured from lignocellulosic fibres with application of heat and/or pressure*” (AFNOR 2009). Approximately 68% of all fibreboard manufactured in Europe is MDF (EPF 2024). Widely used in the furniture and parquet industries, its worldwide production has increased fivefold in 20 years, and now exceeds 100 million tonnes (FAOSTAT 2024). At present, these panels are mainly made from virgin wood, as there is no cost-effective industrial method for recycling them. The European project EcoReFibre aims to propose a profitable process for incorporating up to 25% of recovered fibres into new MDF panels (EcoReFibre consortium 2024). This raises the question: how many times can the same wood fibre be recycled? According to the paper industry, the length and strength of the fibres greatly influence the breaking energy of the paper (Wathén 2006). As MDF is also a wood fibre network, it is therefore interesting to study these two elements throughout the recycling cycles. The objective is to focus on individual wood fibres and to characterise them mechanically after 1 to 6 recycling cycles to understand the impact of the process on fibre quality. A study of fibre morphology is also being carried out in parallel, but is not discussed further in this paper.

### Materials and methods

#### *Recycling experiment*

To simulate the effect of recycling cycles on wood fibres, a closed-circuit recycling experiment was designed. The aim was to produce laboratory-made MDF panels. Consequently, certain parameters, such as the amount of water added, were altered at the start of each new cycle. Moreover, the disintegration stage was designed to be as soft as possible in order to preserve the integrity of the fibres as much as possible.

Initial panels were made using industrial fibres from Unilin (step 1 in Fig. 1 and 2; they represent the first generation). Urea-formaldehyde (UF) adhesive was chosen as it is the glue most commonly used on the market (Mantanis et al 2017). The panels were then cut for bending tests (step 2, inspired by EN 310 standard). The tested pieces and panel offcuts were recycled by immersing them in water at 95 °C for about 6 hours and then passed through a hammer mill without a size screen (step 3). Then the fibres were dried in a climatic chamber at 70 °C with a humidity of 25% (step 4), which should result in a moisture content of 4 %. Once dry, the fibres were used to make a new MDF. Only fibres from the previous cycle were used, no virgin fibres were added to the board. In total, 6 recycling cycles have been carried out.

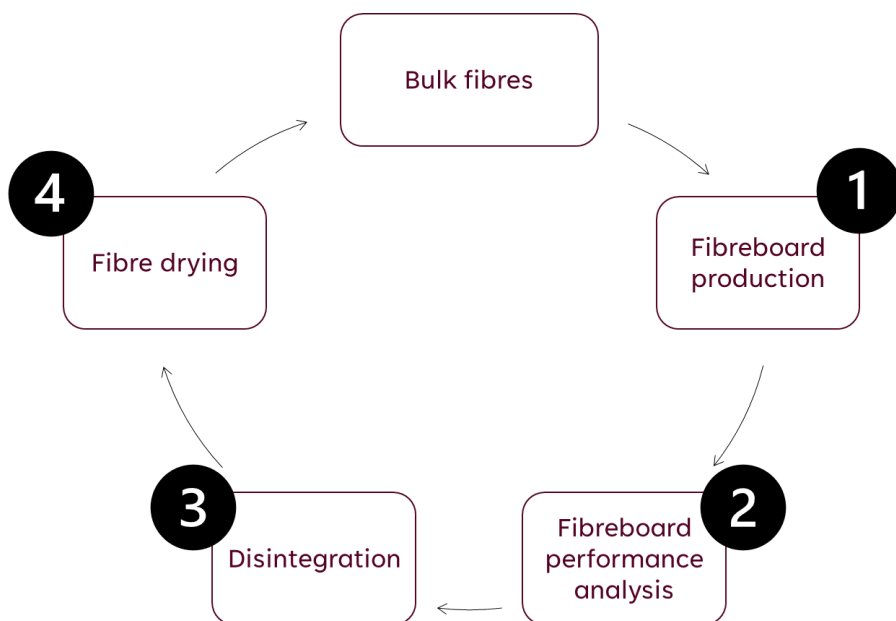


Fig. 1: Simplified diagram of the recycling experiment (4 steps)

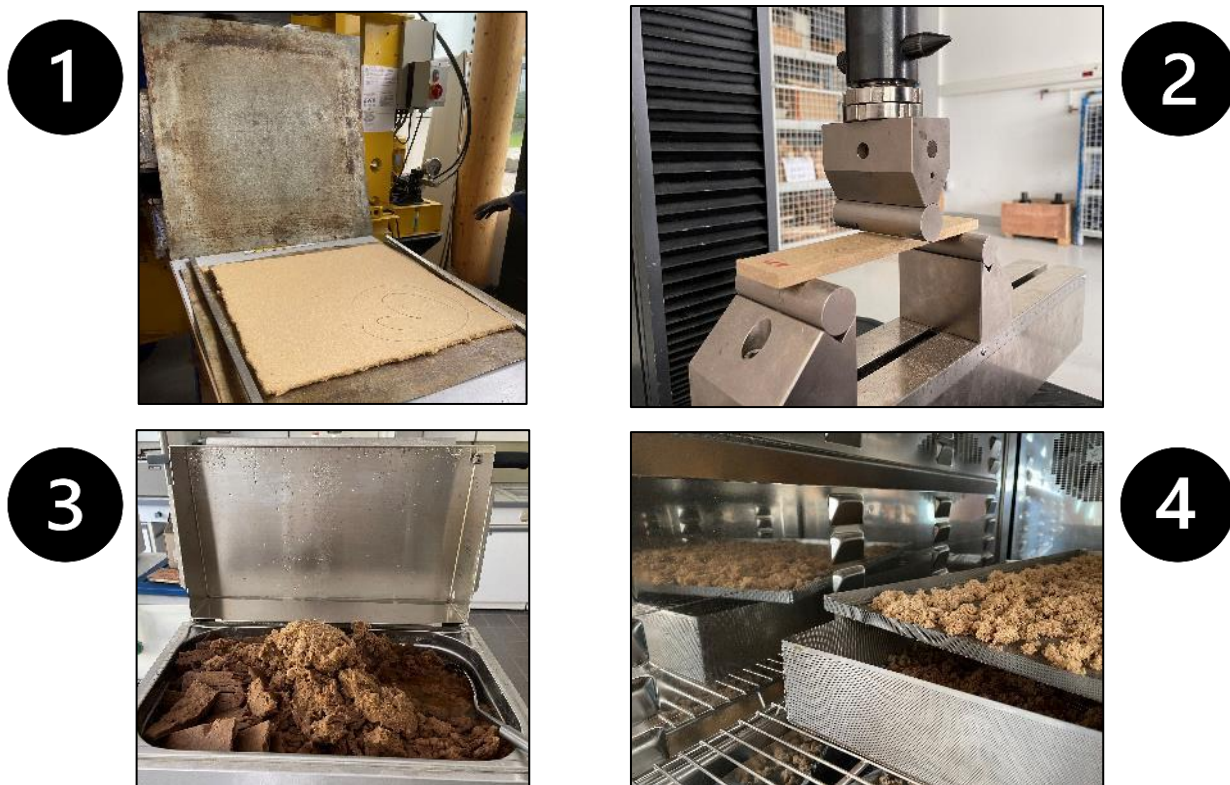


Fig. 2: Images showing the 4 stages of the experiment

### *Mechanical fibre characterisation*

Before making each new generation of panels, fibre samples are taken in order to characterise them. As the fibres were recycled 6 times, 7 samples were collected. All samples were sieved and the fraction smaller than 1 mm, which should contain largely single fibres, was tested.

As testing single fibres was time-consuming and it is difficult to draw conclusions from a small number of tests, a standard paper industry test was also used to determine fibre strength. Handsheets were made following an adapted TAPPI method, with the fibres from each recycling experiment. The tensile strength of the handsheets was measured using a zero-span test (ISO 15361 2000). The strength measured is then only due to the fibres held between the two jaws: this test gives directly the fibre strength.

Sheets containing 100% recovered fibres were too fragile so it was decided to add 15% eucalyptus fibre to strengthen the sheets (Fig. 3). A batch containing 100% eucalyptus fibre has been also added. An average of 11 handsheets from each recycle were formed.



Fig. 3: Example of a 20 cm diameter handsheet containing 85% of recovered fibres and 15% of eucalyptus fibres

Two rectangular samples measuring 2.54 x 10 cm are cut from each sheet, weighed to determine their precise grammage (Eperen 1996) and are tested on the zero-span test machine (Fig. 4).



Fig. 4: Zero-span machine used for tensile tests, left: zoom of jaws containing a sample, right: samples after the test



## Results

A poster will include the first results of this study.

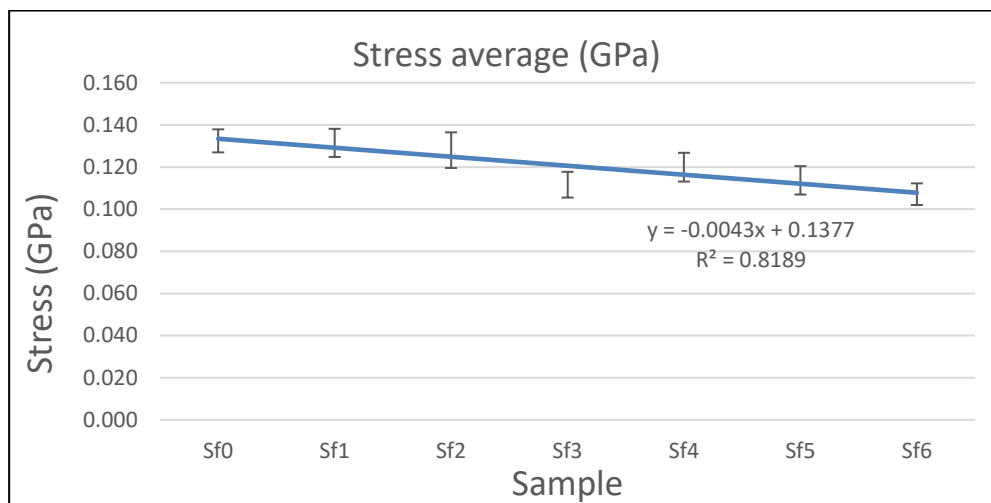


Fig. 1: Average stress for each set of handsheets

“Sf0” refers to sheets made from the first fibres (which have not yet been recycled). “Sf6” represents sheets made from fibres that have been recycled 6 times. The zero span results show very little variation. A linear relationship can be demonstrated between the samples and the recorded stress. A loss of less than 20% is observed between the initial fibres and those that have gone through 6 recycling cycles.

## Acknowledgement

The authors want to thank the Centre Technique du Papier of Grenoble, France, in particular Priscilla MARQUET, for the collaboration on the zero-span test.

The authors would like to thank the many people involved in the various wood recycling research projects. EcoReFibre project is funded by Horizon Europe (Call: HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01) from May 2022 to April 2026.

## References

- AFNOR (2009) NF EN 316. Norme européenne. B 54-050. AFNOR.
- EcoReFibre consortium (2024) Horizon Europe Project EcoReFibre Website. Retrieved 19 September 2024 (<https://ecorefibre.eu/>).
- Eperen, Van (1996) Zero-Span Breaking Strength of Pulp (Dry Zero-Span Tensile).
- EPF. 2024. ‘EPF Annual Report 2023-2024’.
- FAOSTAT. 2024. ‘Forestry Production and Trade’. Retrieved 18 June 2024 (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>).
- ISO 15361. 2000. ‘Pulps — Determination of Zero-Span Tensile strength, Wet or Dry’.
- Mantanis GI, Athanassiadou ET, Barbu MC, Wijnendaele K (2017) Adhesive Systems Used in the European Particleboard, MDF and OSB Industries. Wood Material Science & Engineering 13(2):104–16. doi: 10.1080/17480272.2017.1396622.
- Wathén 5 (2006) Studies on Fiber Strength and Its Effect on Paper Properties. Helsinki University of Technology.

## **Bois lamellé collés de feuillus de qualité secondaire : quelles optimisations pour une utilisation en structures ?**

PILON Martin, BLÉRON Laurent

LERMAB, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Épinal, France

[martin.pilon@univ-lorraine.fr](mailto:martin.pilon@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** construction ; feuillus ; bois lamellé-collé ; analyse économique ; rendement matière, dimensionnement

### **Contexte et objectifs :**

La ressource en bois feuillu en Europe Occidentale et en particulier en France est abondante (IGN 2023), mais pas forcément valorisée, notamment pour des grumes dites de qualité secondaire, en produit avec une valeur ajoutée importante. Ces grumes correspondent aux catégories C ou D d'après les normes NF EN 1316-[1, 2, 3]. Une diminution des ressources de résineux dans les années à venir du fait du changement climatique (Vacek et al 2004), et des problèmes sanitaires sur certaines essences de feuillus, comme par exemple avec la chalarose du frêne, vont amener des volumes disponibles importants sur les marchés.

Du fait des défauts des grumes de qualité secondaire, principalement la présence de nœuds et des défauts de rectitude, l'utilisation en sciage massif comme bois d'œuvre semble difficile. Un des débouchés possibles de cette ressource pourrait être la fabrication de bois lamellé collé (BLC). En effet le procédé permet de purger les défauts de singularité et le billonnage en petites longueurs puis la recomposition par aboutage permet d'optimiser le rendement matière vis-à-vis des défauts de rectitude des grumes. De plus, la fabrication de BLC de feuillus nécessiterait peu d'investissements pour des nouvelles unités de production, en faisant l'hypothèse que les usines de BLC résineux puissent être utilisées également pour la fabrication de BLC feuillus, avec quelques adaptations mineures.

L'idée de BLC de feuillus n'est pas nouvelle (Aicher et al 2014) et des produits émergent sur le marché comme ceux des entreprises Fagus et Manubois. Leur développement à plus grande échelle semble limité principalement par leur coût, plus élevé que des produits à base de résineux. Une des raisons de ce coût important semble être le faible rendement matière de la transformation de la grume jusqu'à l'avivé classé (Schlotzhauer et al 2019, Torno et al 2013). Ce rendement reste à préciser du fait des différences dans les résultats de la littérature. De plus ces études sont faites avec un séchage en avivés et non en plot, alors que ce dernier semble classiquement utilisé pour des usages de feuillus en menuiserie. Via une étude sur le rendement matière, l'objectif vise à faire une analyse économique des différentes étapes de la fabrication du BLC de feuillus : pour estimer le coût de fabrication, identifier des leviers permettant de le minimiser, ainsi que de le comparer à celui du BLC de résineux.

D'un autre côté, ces essences feuillues ont pour la plupart des propriétés mécaniques supérieures aux résineux, en particulier pour les propriétés de résistances. Le second objectif est de déterminer, via une estimation du gain de matière possible en comparaison avec une solution en résineux, les utilisations optimales de solutions BLC feuillus. Ainsi une comparaison avec le surcoût du BLC de feuillus déterminé avec l'étude de rendement matière, permettra de connaître les cas d'utilisation pertinents d'un point de vue économique.

## Matériel et méthodes :

### *Rendement matière et coût de fabrication*

L'analyse de rendement matière est faite à partir d'un ensemble de grumes de hêtre (58m<sup>3</sup>), chêne (30m<sup>3</sup>) et frêne (30m<sup>3</sup>), de qualité C et D. Le choix des longueurs de billonnage est effectué suivant les défauts des grumes (rectitude et gros nœuds). Le sciage en plateau, d'épaisseurs 45mm et 60mm, est effectué avec une scie bi-coupe ayant une lame d'épaisseur d'environ 5mm. L'ensemble d'un billon est scié avec la même épaisseur de plateau. Le sciage en avivés est réalisé après séchage avec une déligneuse qui optimise entre deux largeurs de commande, une largeur principale A et une largeur secondaire B. La déligneuse choisit en fonction de la largeur du plateau les largeurs d'avivés qui génèrent le moins de perte. Une largeur de produit secondaire de 80mm a été ajoutée dans certains cas pour limiter les pertes, mais dans ce cas la déligneuse a été programmée pour empêcher de scier deux largeurs de 80mm et privilégier le sciage d'un produit principal. L'ensemble des commandes utilisées sont précisées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Liste des commandes utilisées pour le sciage en avivés

Commande	A	B	2 produits B	épaisseur
1	160	110	Oui	45
2	140	80	Non	45
3	160	80	Non	45
4	140	110	Oui	45
5	140	100	Oui	60

Sur l'ensemble des grumes (107), une traçabilité de la grume jusqu'aux avivés finaux est mise en place. Ainsi une numérotation est donnée pour les grumes, les billons, les plateaux puis les avivés. Pour chaque billon la longueur et deux mesures de diamètre à chaque extrémité sont relevées. Le volume du billon est obtenu via un volume de cylindre. Le diamètre du cylindre est la moyenne des deux moyennes des diamètres des deux extrémités. Le volume des avivés non classés et non rabotés est obtenu par dénombrement en connaissant leur section nominale et la longueur du billon. Le volume des avivés classés sera également obtenu de la même manière après un classement visuel. Le volume des avivés rabotés sera connu en mesurant leur longueur et en connaissant la section de commande du rabotage.

L'analyse économique sera faite en supposant un prix volumique des grumes, en connaissant le rendement matière et en supposant un coût pour chacune des opérations suivantes : billonnage, sciage en plateau, séchage, sciage en avivés, classement et rabotage.

### *Utilisation optimale d'éléments BLC feuillus*

Pour déterminer les usages de BLC feuillus les plus économes en volume matière par rapport à des solutions BLC résineux usuelles, une étude paramétrique est réalisée sur les trois cas de dimensionnement suivants : cas de compression de type poteau, cas de traction de type tirant, cas de flexion de type poutre. Pour chacun de ces cas, le dimensionnement est effectué d'abord avec une solution en résineux classique (G124h) puis avec une solution « BLC feuillu ». Le résultat final est le ratio de volume matière entre la solution en résineux et la solution en feuillus. Les dimensionnements sont effectués selon les Eurocodes et les annexes françaises en vigueur. Les notations utilisées ci-dessous sont celles de ces normes.

Les hypothèses communes aux trois cas de dimensionnement sont les suivantes : concernant les propriétés de la solution « BLC feuillu », les valeurs fournies par le fabricant Manubois

pour du BLC de hêtre sont utilisées ici comme référence et précisées dans le Tab. 2. Le hêtre est choisi car ses propriétés mécaniques peuvent constituer une borne haute par rapport aux autres feuillus. Le coefficient partiel  $\gamma_m=1,25$  est utilisé pour les deux solutions. Les facteurs de modification  $k_{mod}$  est pris égal à celui du GI24h également pour la solution BLC de feuillus. L'analyse est restreinte au cas de dimensionnement à froid à l'état limite ultime (ELU), et à l'état limite de service (ELS) pour les dimensionnements de poutre, mais uniquement avec les vérifications de type flèche.

Tab. 2 : Propriétés mécaniques utilisées – solution BLC feuillus et BLC résineux

Propriétés	GI24h	BLC de hêtre
Résistance à la flexion - $f_{m,0,k}$ [MPa]	24	36
Résistance à la traction - $f_{t,0,k}$ [MPa]	19,2	27
Résistance à la compression - $f_{c,0,k}$ [MPa]	24	50
Résistance au cisaillement - $f_{v,k}$ [MPa]	3,5	6
Module d'élasticité moyen - $E_{m,0,mean}$ [MPa]	11500	14400
Module d'élasticité caractéristique - $E_{m,0,k}$ [MPa]	9600	12900
Module de cisaillement - $G_{mean}$ [MPa]	650	650
Masse volumique moyenne - $\rho_{mean}$ [MPa]	420	710

Pour le cas de compression de type poteau : est considérée une barre de longueur de flambement  $L_{eff}$ , soumise à un effort normal de compression (F), de section rectangulaire et avec trois ratios largeur (b) sur hauteur (h) possibles [0.5 ; 0.75 ; 1]. La longueur de flambement  $L_{eff}$  est identique dans les deux directions ( $L_{eff,y}$  égale à  $L_{eff,z}$ ), variable et comprise entre 1 et 10m. L'effort est variable, avec le ratio F sur  $k_{mod}$  compris entre 10 et 3000kN. Un facteur de rectitude  $\beta_c$  de 0,1 est utilisé. Les dimensions de la section sont déterminées pour obtenir un taux de travail de 100%. L'élanement de la solution en résineux est déterminé avec la formule suivante :

$$\lambda = \frac{L_{eff}\sqrt{12}}{b}$$

Tab. 3 : Scénarios de dimensionnement pour le cas de flexion de type poutre

Scénarios	Charges [kN/m <sup>2</sup> ]					Limites flèches		Classe de service
	permanentes	exploitations	neige	vent pression	vent dépression	$w_{inst(Q)}$	$w_{net,fin}$	
1.Toiture légère	0,4	0	0,36	0,29	-0,39	L/300	L/250	2
2.Toiture lourde	2,5	0	0,36	0,29	-0,39	L/300	L/250	1
3.Plancher léger - bureau	1,2	3,5	0	0	0	L/300	L/300	1
4.Plancher lourd -résidentiel	2,4	2	0	0	0	L/300	L/300	1

Pour le cas de traction de type tirant : est considérée simplement une barre soumise à un effort normal de traction, dimensionnée à l'ELU à froid. Enfin, pour le cas de flexion de type poutre : est considérée une barre sur deux appuis avec chargement uniforme, correspondant à une bande de chargement de largeur (e). Pour essayer d'encadrer au mieux l'ensemble des cas de dimensionnement courants, quatre scénarios de charges sont choisis et précisés dans le Tab. 3. Le coefficient  $k_h$  est pris égal à 1 dans les deux cas. La vérification est faite à l'ELU en flexion

et en cisaillement. Pour le calcul des déplacements, la déformée de cisaillement est considérée, de même que le poids propre de la poutre. Le dimensionnement est réalisé d'abord pour une poutre BLC résineux avec un ratio largeur sur hauteur fixé à 0.2. Une fois les dimensions déterminées, le dimensionnement est effectué pour le cas BLC feuillu mais cette fois en fixant la largeur, égale à celle de la solution BLC résineux.

## Résultats et discussion

### Rendement matière

L'analyse de l'influence sur le rendement matière des paramètres suivants sera effectuée : diamètre des billons, qualité C ou D, longueur de billonnage, et sections d'avivés.

### Utilisation optimale d'éléments BLC feuillu

Pour le cas de compression de type poteau, des gains de matière importants sont remarqués, surtout pour des éléments peu élancés et de section carré, comme mis en évidence par les figures Fig. 1 et 2. Au maximum un ratio de 2,1 peut être atteint pour des éléments non soumis au flambement (correspondant au ratio des  $f_{c,0,k}$ ). Pour des sections carrées, un ratio de 1,45 est atteint pour des éléments résineux d'élancement réduit (autour de 50), correspondant par exemple à une section de 210 x 210mm pour une longueur de flambement de 3m. De plus, le gain de matière évolue selon l'élancement de la solution BLC résineux.

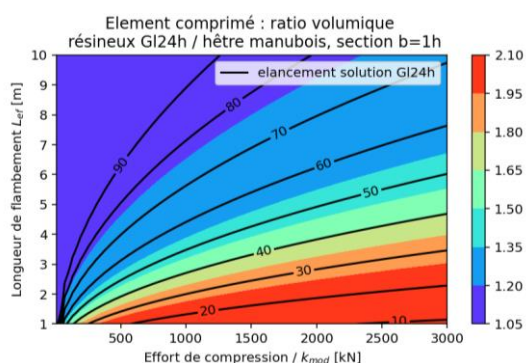


Fig. 1 : Ratio de volume matière résineux/ feuillu – poteau en compression – section carré

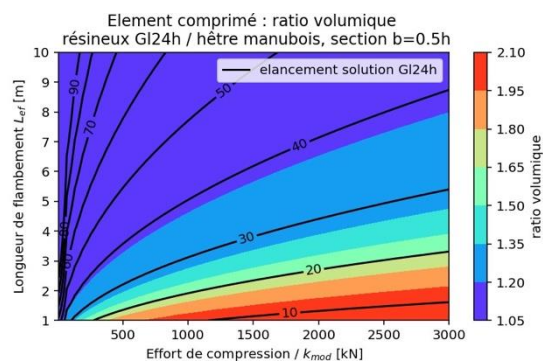


Fig. 2 : Ratio de volume matière résineux/ feuillu – poteau en compression – section b=0.5h

Pour les cas de traction de type tirant : le ratio de volume est directement égal au ratio des résistances à la traction, si on ne considère pas l'effet de la présence d'assemblages, soit un ratio de 1,4.

Pour le cas de flexion de type poutre : les résultats pour deux scénarios sont donnés avec les figures Fig. 3 et 4. Peu de gain de matière est observable, et les résultats sont assez similaires entre les différents scénarios. Dans les cas usuels de longueur et d'entraxe, le gain de matière est d'environ 1,08, correspondant logiquement à la racine cubique du ratio des modules d'Young. Les gains les plus importants sont observés pour des éléments pour lesquels l'état dimensionnant est l'ELU, c'est-à-dire une poutre avec des charges élevées (scénario 2,3 et 4) et une entraxe importante (ratio entraxe sur longueur proche de 1). Dans ce cas, un ratio de volume autour de 1,2 peut être atteint, cela correspond à des ratios hauteur sur longueur supérieurs à 0,1.

## Conclusion et perspectives

D'un point de vue économique, les débouchés d'une solution « BLC feuillu » semblent être uniquement sur des éléments soumis à de l'effort normal, traction ou compression pour des

éléments peu élancés. En imaginant, par exemple, un surcoût de fabrication de 40% par rapport à un BLC résineux, ce surcoût pourrait être compensé par un gain de matière équivalent sur des poteaux de section carrée avec un élancement inférieur à 50 et sur des tirants. En revanche, il ne pourrait pas être compensé sur des poutres.

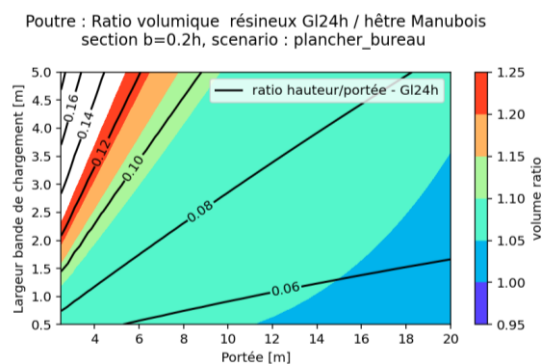


Fig. 3 : Ratio de volume matière résineux/ feuillus – poutre en flexion – scénario plancher bureau

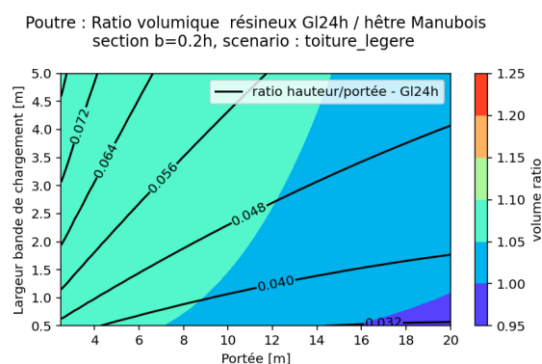


Fig. 4 : Ratio de volume matière résineux/ feuillus – poutre en flexion – scénario toiture légère

Pour optimiser les usages de BLC feuillus, il conviendrait donc de préciser en premier lieu les caractéristiques utiles pour les éléments soumis à un effort normal. Cela pourrait passer par une meilleure corrélation entre la propriété de résistance utilisée pour le classement (résistance à la flexion  $f_{m,0,k}$ , ou peut-être la résistance à la traction  $f_{t,0,k}$  à terme) et les propriétés spécifiquement utilisées pour des éléments soumis à des efforts normaux (résistance à la traction  $f_{t,0,k}$ , résistance à la compression  $f_{c,0,k}$  et masse volumique  $\rho_{k}$  pour la portance locale des connecteurs). De plus, il conviendrait d'optimiser les résistances des assemblages pour des éléments soumis à des efforts normaux, afin d'en diminuer le coût. Cela pourrait se faire avec une diminution du nombre de broches via une meilleure connaissance de l'influence du fretage sur la portance des broches, et sur la rupture par fendage dans un assemblage.

## Remerciements

Ce projet est réalisé en collaboration avec le CRITT-bois et l'entreprise Weisrock. Il a été financé par l'Etat dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME.

## Références

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (2023) Inventaire forestier national – Mémento.

Vacek Z, Vacek S, Cukor J (2023) European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies, *Journal of Environmental Management*, 332.

Aicher S, Cristian, Zachary C, Dill-Langer G (2014) Hardwood Glulams – Emerging Timber Products Of Superior Mechanical Properties, *World Conference on Timber Engineering*.

Schlotzhauer P, Kovryga A, Emmerich L, Bollmus S, Van de Kuilen JW, Militz H (2019) Analysis of Economic Feasibility of Ash and Maple Lamella Production for Glued Laminated Timber, *Forest* 10, 529.

Torno S, Knorz M, Van de Kuilen JW (2013) Supply of beech lamellas for the production of glued laminated timber. *International Scientific Conference on Hardwood Processing*.

## **Projet Wood2Wood : Décontamination et valorisation matériau du bois post-consommateur par couplage de procédés thermochimique et biologique.**

GIUSTINIANI Coline<sup>1</sup>, AYADI Melek<sup>1</sup>, ANTOINE Marie-Laure<sup>1,2</sup>, PERRIN Christelle<sup>1</sup>, LALLEMAND Julien<sup>1</sup>, BESSERER Arnaud<sup>1</sup>, BROSSE Nicolas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, LERMAB, France

<sup>2</sup>ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Epinal, France

[coline.giustiniani@univ-lorraine.fr](mailto:coline.giustiniani@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** explosion à la vapeur ; dépollution ; bois déchets ; mycocomposite ; biosorption

### **Contexte et objectifs**

Ce travail de thèse portant sur l'élaboration de mycocomposite par procédés couplant des voies thermochimique et biologique, s'inscrit dans le cadre du projet horizon « Wood to Wood (W2W) ». Dans sa globalité, W2W vise la valorisation multidimensionnelle en cascade de bois issus des déchets de construction et de démolition, de meubles. Le projet se divise en quatre éléments/piliers fondamentaux : 1) Technologies avancées de séparation et de tri ; 2) Processus et technologies de recyclage ; 3) Outils numériques pour l'amélioration des flux circulaires de matériaux secondaires ; et 4) Cadre de soutien en matière de politique, de marché et de compétences. W2W a pour objectif de mettre en place des chaînes de valeur efficaces et durables pour la production de bois dépollué, de matériaux de construction biocomposites, de biopolymères, de polyols, de détergents chimiques et la récupération de nutriments, grâce à l'utilisation de technologies et d'outils qui permettent de sélectionner des voies optimales en cascade pour les utilisations ultérieures des produits du bois et de leurs matériaux. L'approche holistique de W2W vise à réduire la demande de matériaux vierges, à diminuer la quantité de déchets envoyés en décharge ou à l'incinération, à permettre la création de nouveaux produits à valeur ajoutée à partir de ces déchets, et à soutenir la transition vers une économie circulaire en favorisant des systèmes en boucle fermée où les matériaux sont réutilisés en continu.

Le travail de thèse présenté ici, s'inscrit au sein du pilier 2 « Processus et technologies de recyclage », et plus particulièrement dans les activités relatives aux « Approches innovantes d'élimination des additifs à l'aide de procédés chimiques et de biorestauration avancés pour une gestion durable des déchets bois ». En effet, ce travail de recherche s'articule autour de deux grands axes : i) le transfert du procédé d'élimination de la résine UF (Urée-Formaldéhyde) des fibres de MDF (Medium Density Fiberboard) (Troilo et al. 2023) à un mélange de particules de bois BR1 et BR2 (Bois de Récupération classés déchets non dangereux) puis de bois C (Bois Récupérés classé déchets dangereux), en s'appuyant sur les capacités de biosorption et d'élimination de biocides organiques, mises en évidence dans les travaux récents (Pandharikar et al. 2022), tout en les couplant au procédé d'explosion à la vapeur à l'échelle pilote (dispositif disponible sur le campus bois d'Epinal). ii) Les effluents liquides provenant du procédé seront soumis à une biodégradation en utilisant à la fois des champignons lignivores et des champignons détoxifiants, selon le protocole récemment mis en place au sein du laboratoire. (Troilo et al. 2023). Le dispositif de filtration reposera sur la mise en place d'une fermentation mixte en réacteur agité impliquant un matériau composite à haut potentiel de sorption : un mycocomposite réalisé à partir de bois BR1 détoxifié par explosion à la vapeur. En effet, les premiers résultats obtenus (Aguilar et al. 2024) sont encourageants et montrent que l'explosion à la vapeur permet de fonctionnaliser le bois, tout en stimulant la croissance fongique, permettant ainsi la fabrication de mycocomposites à partir de bois BR1. Des essais d'explosion

à la vapeur sur des mycomposites, en vue de produire des molécules d'intérêts comme le chitosan et des fibres de bois bifonctionnelles, seront également réalisés.

### **Matériels et méthodes**

Le matériel utilisé sera le bois BR1 et BR2, envoyés par les partenaires du projet (CF2P et Ecomaison). L'espèce fongique étudiée sera le *Trametes versicolor*.

La caractérisation des fibres et des matériaux obtenus sera réalisée selon une approche multimodale et multi-échelle. Les techniques telles que la microscopie corrélative, la tomographie aux rayons X, la SPIR (spectroscopie dans le proche infrarouge) et diverses techniques de chimie analytique (UHPLC [chromatographie liquide à ultra-haute performance], XRF [Spectrométrie de fluorescence X], HPTLC [chromatographie sur couche mince haute performance], ...) seront utilisées en combinaison avec techniques de caractérisation des propriétés physique des matériaux élaborés (porosité, lambdamétrie, acoustique, etc.).

### **Résultats attendus**

En fonction des premiers résultats obtenus, le procédé d'explosion à la vapeur sera optimisé afin d'obtenir les matières ou molécules d'intérêt selon les modalités désirées. Les mycomposites constitués de bois BR1 dépollués, devront être capable de capter les molécules polluantes par phénomène de sorption. Les conditions de culture du champignon seront également optimisées.

### **Conclusion et perspectives**

A terme, ce projet permettra à la fois de revaloriser le bois « déchet », de produire de nouveaux matériaux innovants, ainsi que d'extraire des molécules d'intérêts. Cette approche multifactorielle s'appuie sur l'envie de dynamiser l'ensemble de la filière bois, le tout en ayant une approche d'économie circulaire durable.

### **Remerciements**

Ce travail fait partie du projet W2W Horizon Europe, financé par l'Union européenne. Les auteurs remercient la CF2P, Ecomaison, ainsi que l'ensemble de 22 autres partenaires du projet.

### **Références**

Aguilar K, Figel L, Saker S, Soufflet L, Brosse N, Besserer A (2024) Steam Explosion: A Booster for Fungal Growth in a Myco-composite, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12: 11650–11659.

Pandharikar G, Claudien K, Rose C, Billet D, Pollier B, Deveau A, Besserer A, Morel-Rouhier M (2022) Comparative Copper Resistance Strategies of *Rhodonia placenta* and *Phanerochaete chrysosporium* in a Copper/Azole-Treated Wood Microcosm, *Journal of Fungi*, 8(7): 706.

Troilo S, Besserer A, Rose C, Saker S, Souffle L, Brosse N (2023) Urea-Formaldehyde Resin Removal in Medium-Density Fiberboards by Steam Explosion: Developing Nondestructive Analytical Tools. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11: 3603–3610. \_



## **Couplage ACV/AFM dynamique pour l'ACV de transition : application à la filière forêt-bois française**

BOUTIN Alexis<sup>1,2</sup>, MICHAUD Franck<sup>1</sup>, VENTURA Anne<sup>2</sup>, FRANCOIS Cyrille<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ESB, LIMBHA, Nantes, France,

<sup>2</sup> Univ Gustave Eiffel, MAST-GPEM, Bouguenais, France,

<sup>3</sup> ENTPE, LAET, Vaulx-en-Velin, France

[alexis.boutin@lilo.org](mailto:alexis.boutin@lilo.org)

**Mots clefs :** Analyse Flux Matière (AFM), Analyse du Cycle de Vie (ACV), ACV de transition, Couplage, Dynamique, Prospective

### **Contexte et objectifs**

La santé de la forêt française est menacée, notamment par les impacts du changement climatique (crise des scolytes, sécheresses, incendies, etc.), et sa capacité à répondre aux besoins toujours croissants de l'industrie pourrait donc être compromise d'après l'Académie des sciences (2024). Une priorisation des usages du bois devra être décidée à l'échelle des territoires (régions, France métropolitaine, etc.), si sa disponibilité se trouve limitée. Le classement traditionnel de « noblesse d'usage » du bois (bois d'œuvre, bois d'industrie puis bois énergie) n'est pas forcément le meilleur au regard de son potentiel d'atténuation du changement climatique en fonction du contexte local, au travers des trois services qu'elle rend (appelés 3S pour Séquestration, Stockage et Substitution).

L'analyse de cycle de vie (ACV) des produits permet de comparer des produits ayant des fonctions identiques, ceux-ci pouvant être constitués de matériaux différents, mais ne prend en compte ni l'adéquation entre la ressource disponible et la demande pour chaque usage, ni la variabilité des fonctionnalités rendues par les différents scénarios d'usage de cette ressource. Pour prendre en compte la disponibilité des ressources par rapport à la demande, il faut tenir compte des résultats obtenus grâce à l'analyse flux matière (AFM). Pour répondre à la question « pour une unité de bois, quelle est la chaîne de valeur la plus vertueuse sur chacun des différents impacts environnementaux et notamment le changement climatique ? », il faut pouvoir autoriser une variabilité des fonctionnalités car chaque scénario de chaîne de valeur différente produira potentiellement des fonctionnalités différentes.

Il est donc nécessaire d'avoir une approche plus holistique pour répondre à ces questions, en intégrant l'ensemble de la chaîne de valeur découlant de la ressource forestière et les quantités totales produites et consommées sur un territoire donné dans leur cadre socio-économique. C'est l'objet d'une nouvelle méthode d'analyse environnementale, baptisée ACV de transition par Ventura (2022), permettant de prendre en compte la dynamique des systèmes et d'évaluer l'impact de scénarios prospectifs sur un système entier pour répondre à ces problématiques.

### **Matériel et méthode**

La méthodologie suivie s'articulera autour de 3 axes principaux :

- Les limites du système étudié par l'ACV de transition doivent être retravaillées par rapport à celles utilisées pour l'ACV des produits ou l'AFM. Cette démarche mène à la prise en compte de multiples unités fonctionnelles et flux de référence., qui rend caduque le calcul matriciel habituellement utilisé pour résoudre les problèmes d'ACV de produits.

- La prise en compte de la temporalité dans le couplage ACV/AFM nécessitera le recours à un inventaire du cycle de vie dynamique restaurant les relations entre coproduits pour construire une base de données de processus non allouée aux produits multisortants, satisfaisant aux exigences de l'approche systémique de l'ACV de transition, et donc la construction d'une base de données adaptée pour la filière forêt-bois. Pour cela, il faudra connaître le temps de traversée d'une unité de bois à travers la filière, c'est-à-dire le nombre de pas de temps entre la mobilisation de la matière première et sa mise sur le marché comme produit fini.
- Afin d'améliorer la robustesse des données d'inventaire utilisées, une méthode de quantification des incertitudes sera développée, indépendante des choix de modélisation fait.

### Résultats attendus

Une fois les verrous scientifiques levés, le cadre méthodologique préparatoire à l'application de l'ACV de transition à la filière forêt-bois en France sera réalisé (réseaux d'acteurs mis à part, relevant davantage des SHS). Les AFM précédemment développées par Boutin (2023) et le projet ADEME BACCFIRE seront utilisées comme points de départ de ce travail, de même que les scénarios de ces projets serviront de base pour modéliser la partie prospective et évaluer les évolutions temporelles des impacts environnementaux de la filière entre aujourd'hui et les horizons 2030 et 2050. Les apports méthodologiques développés lors de cette thèse pourront de la même manière (sous réserve que les développements soient compatibles dans leurs chronologies), alimenter le projet BACCFIRE, présentée par Fournier et Deleuze (2023). En particulier, la méthode de quantification d'incertitudes développée dans cette thèse pourra alimenter l'AFM réalisée dans le cadre de BACCFIRE et améliorer la robustesse de son modèle.

### Conclusion et perspectives

La méthodologie développée durant cette thèse permettant la réalisation d'ACV de transition devra être répliquable à d'autres filières que la filière forêt-bois.

Cette thèse s'intégrera dans la communauté de recherche du secteur et y communiquera ses résultats comme François et Boutin (2024), et s'articulera autour de des projets de recherche déjà existants, tels que les projets ADEME Graine BACCFIRE et WOODYN (débutant en même temps que cette thèse et en élargissant son cadre, et centré sur la dynamisation du système et la révision d'indicateurs ACV dynamiques).

### Références

- Académie des sciences (2024) Les forêts françaises face au changement climatique. [https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/060623\\_foret.pdf](https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/060623_foret.pdf)
- François C, Boutin A (2024) Webinaire Analyse de flux de bois dans la filière Forêt-Bois, <https://clap.univ-eiffel.fr/videos/webinaire-afms-filiere-foret-bois-20240124-v1/>
- Boutin A (2023) Analyse de flux de matière de la filière forêt-bois à partir des consommations finales, EVEA, Université Gustave Eiffel. <https://hal.science/hal-04443449>
- Fournier S, Deleuze C (2023) Développement de schémas de filières génériques pour calculer la contribution du secteur forestier à l'atténuation : présentation du projet BACCFIRE et de ses liens avec la plateforme Capsis. [https://capsis.cirad.fr/capsis/\\_media/documentation/reports/25\\_forem\\_2023\\_s.fournier.pdf](https://capsis.cirad.fr/capsis/_media/documentation/reports/25_forem_2023_s.fournier.pdf)
- Ventura A (2022) Transition life cycle assessment: A new method to face ecological transition, *Front. Sustain.*, vol. 3, p. 801668, doi : 10.3389/frsus.2022.801668

## Un modèle numérique au cœur de la stratégie d'optimisation du séchage du bois alimenté par des énergies intermittentes

STÉPHAN Antoine<sup>1</sup>, PERRÉ Patrick<sup>2,3</sup>, L'HOSTIS Clément<sup>4</sup>, RÉMOND Romain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, 88000 Épinal, France

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), 51110 Pomacle, France

<sup>1</sup>FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, 77420 Champs-sur-Marne, France

[romain.remond@univ-lorraine.fr](mailto:romain.remond@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** modélisation multi-échelles ; optimisation aléatoire ; automate avancé ; méthode inverse

### Contexte et objectifs

Le séchage naturel est un processus intermittent, qui alterne entre des conditions sévères et douces de séchage, c'est à dire respectivement entre des humidités d'équilibre (EMC) basses et hautes. Dans les régions fortement exposées aux radiations solaires des séchoirs solaires peuvent être utilisés pour accélérer le processus (Luna et al 2009), mais sans contrôle de l'humidité d'équilibre la qualité du séchage n'est pas garantie. Pour pallier à cette situation tout en tirant parti de l'énergie solaire pour le séchage du bois plusieurs travaux se sont intéressés aux systèmes hybrides, comme dans le projet SolarWood (Bailly et al 2020). Des conduites traditionnelles ont été appliquées dans un séchoir à air chaud climatisé, partiellement alimenté par des panneaux solaires thermiques. Dans cette configuration et dans le cas des essences étudiées les résultats annonçaient un retour sur investissement trop long et le système n'a donc pas été testé à l'échelle industrielle.

Les automates utilisés dans le séchage du bois ont des fonctions sommaires de régulation des paramètres de consigne selon les tables de séchage et l'humidité du bois (MC). Certains travaux ont utilisé la logique floue ou des approches statistiques pour permettre d'utiliser les connaissances empiriques et de les implémenter dans des automates de régulation (Wang et al 2001, Allegretti et al 2012), apportant ainsi de nouvelles fonctionnalités attendues par l'industrie. Dans cette même dynamique des travaux ont utilisé des réseaux de neurones pour prédire la qualité du séchage (Aghbashlo et al 2015). La difficile collecte des données nécessaires à leur robustesse rend ces approches encore inadaptées au contrôle de la qualité de séchage. Dans notre cas, où une énergie fluctuante serait utilisée pour le séchage du bois, la gestion des aléas énergétiques requiert une quantité de données plus importante encore.

Des approches déterministes pour le séchage du bois ont été développées dans les quarante dernières années grâce notamment aux avancés dans la modélisation numérique et l'accès facilité aux puissances de calcul. Ces outils ont désormais un potentiel de prédiction et sont utilisés dans l'optimisation du séchage industriel. Certains d'entre eux ont déjà permis de réduire la consommation énergétique du séchage sous vide (Perré et al 2007) et de réduire les coûts du séchage (Salin 2001). L'utilisation d'énergies intermittentes (énergies renouvelables ou de récupération d'autres industries, EnR&R) pour réduire la consommation d'énergie fossile est l'objectif principal de ce travail. Une optimisation semble nécessaire pour atteindre cet

objectif, car les tables traditionnelles et les bases de données empiriques ne permettent pas à un contrôleur de gérer des conditions fluctuantes.

La première partie de ce document présente la stratégie globale adoptée pour tirer parti d'une énergie fluctuante dans le séchage du bois, en tenant compte de plusieurs critères objectifs. Des résultats et perspectives sont présentés dans la deuxième partie.

## Matériel et méthode

La stratégie globale suivie dans ce travail est présentée en Fig. 1. Le cœur de l'approche est le modèle numérique qui estime les meilleures conditions à appliquer au séchoir selon les différentes données d'entrée : (1) l'historique des conditions vues par la charge de bois ; (2) l'énergie disponible à l'instant  $t$  et sa prévision ; (3) les attentes ou objectifs de l'utilisateur en terme de durée, qualité, coût et énergie ; (4) le signal retour des capteurs précisant la cinétique réelle de séchage de différentes planches de la pile de bois.

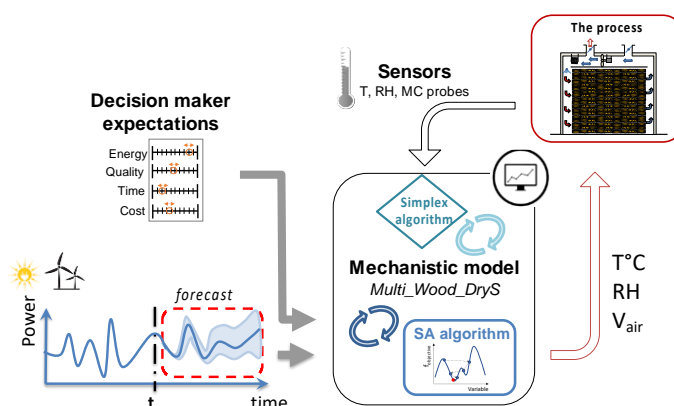


Fig. 1 : Schéma de la stratégie adoptée dans ce travail.

Les différentes composantes de cette stratégie sont décrites dans les sections suivantes.

### *Le modèle numérique du séchage du bois : Multi\_Wood\_DryS*

Au cœur de cette stratégie (Fig. 1), le code multi-échelles et multi-physiques Multi\_Wood\_DryS (Perré et Rémond 2006) a été utilisé. Ce modèle simule le séchage aux trois échelles imbriquées : séchoir, pile et planche. Le code numérique utilisé à l'échelle locale (planche) est une version monodimensionnelle du code TransPore (Perré et Turner 1999) qui permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Un modèle mécanique (Rémond et al 2007) a été intégré dans TransPore pour estimer les contraintes et déformations qui se développent pendant le séchage afin d'évaluer les risques de dégradation de la qualité. L'échelle pile permet de simuler le séchage simultané de plusieurs centaines de planches et prend en compte la variabilité du bois (Perré et al 2007) ainsi que les interactions entre l'air circulant dans la pile et les planches de bois. A l'échelle du séchoir le code Multi\_Wood\_DryS calcule la consommation énergétique nécessaire pour atteindre et maintenir les conditions de séchage, en considérant les performances du séchoir et le comportement de la pile (Perré et al 2007). Des présentations plus détaillées peuvent être trouvées dans ces références.

Le modèle multi-échelles Multi\_Wood\_DryS a été combiné avec un code d'optimisation (Stéphan et al 2024a) pour proposer des conduites de séchage adaptées aux critères de l'opérateur en termes de consommation énergétique, de qualité, de durée et de coût, ces derniers étant pondérés dans une fonction objective, que le code minimise.

Pour prédire le séchage le code de simulation a besoin de connaître des caractéristiques du matériau et des spécificités de la charge de bois. La méthode inverse permet d'estimer certaines de ces propriétés matérielles depuis les sorties observées du processus, notamment la cinétique de séchage. Ouertani et al (2024) a montré que le code TransPore peut estimer les principaux coefficients de transfert, à savoir le coefficient de diffusion et la perméabilité intrinsèque, à partir des cinétiques de séchage au cœur d'une planche, par méthode inverse.

#### *Système hybride : séchoir industriel et panneaux solaires PV/T*

L'approche développée dans ce travail va être testée sur un séchoir pilote de FCBA Bordeaux. Il s'agit d'un traditionnel séchoir à air chaud climatisé (charge utile de 1 à 2 m<sup>3</sup>, Cathild Industrie SA, France) qui a été couplé à des panneaux solaires et photovoltaïques (panneaux hybrides, Cogen'air, Base innovation, Marcheprime, France), à une pompe à chaleur eau/eau et à un ballon tampon. Ces différents éléments sont couplés pour collecter l'énergie solaire lorsqu'elle est disponible, la stocker et/ou l'utiliser pour répondre aux besoins du séchoir ; il est ainsi possible de n'utiliser que l'énergie électrique pour les batteries de chauffe, ou de bénéficier de la contribution de l'énergie solaire.

#### *Caractérisation de la déformation mémoire sous conditions cycliques*

La déformation mémoire du bois peut réduire les contraintes de séchage, et notamment s'il est alimenté par des EnR&R, où peuvent advenir des variations cycliques d'humidité, favorables à son activation. La difficulté à modéliser le développement des déformations mémoire complique l'estimation des contraintes de séchage. L'essai fourche (Stéphan et al. 2024b) a permis d'isoler la déformation mémoire d'échantillons de bois soumis à des cycles de séchage/humidification. Ce dispositif mesure la contrainte et la déformation d'un échantillon de bois fin fixé à l'extrémité d'une fourche en aluminium et soumis à différentes humidités. Elle induit un retrait-gonflement gêné dont la mesure est comparée à celle d'un échantillon jumeau ayant un retrait-gonflement libre pour isoler la part de déformation mémoire.

## Résultats et discussion

### *Avancement sur ces différentes parties de l'approche globale*

#### Estimation de la déformation mémoire sous conditions cycliques

La déformation mémoire augmente avec l'accumulation de variations de MC et tend vers une limite (Fig. 2). Le modèle mécanique actuellement utilisé, qui reprend le modèle mécanosorptif de Fortino et al (2009), donne une simulation de l'essai fourche assez proche des mesures expérimentales (Fig. 2). Les essais fourche apportent cependant des données permettant d'améliorer la formulation du modèle mécanosorptif en identifiant les jeux de paramètres de différentes essences et orientations matérielles.

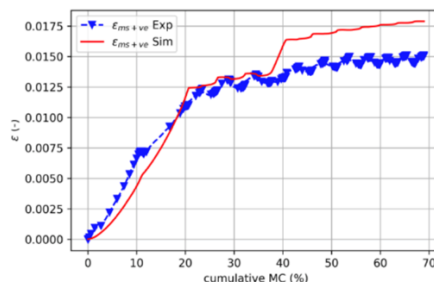


Fig. 2 : Déformation mémoire mesurée par l'essai fourche et simulé avec le modèle mécanique, en fonction de l'accumulation des variations de MC (Stéphan et al. 2024)

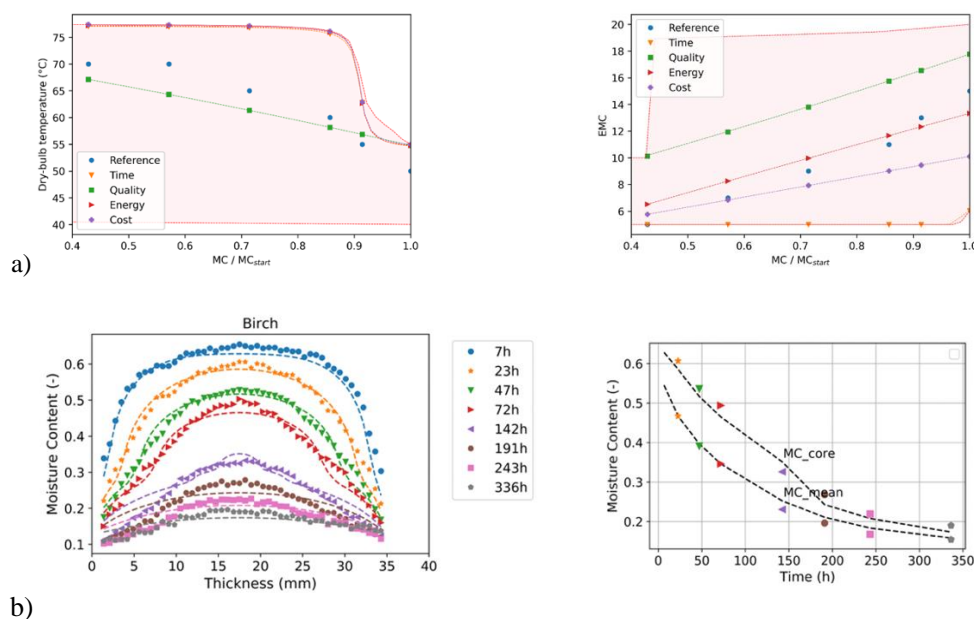


Fig. 3 : a) Conduites de séchage optimisées pour des planches de hêtre, le domaine couvert par les fonctions trajectoires est en rouge transparent, les conduites optimisées sont pour la température sèche (gauche) et l'humidité d'équilibre (droite) selon les différents critères d'optimisation (Stéphan et al. 2024) ; b) comparaison entre les profils de teneur en eau et les cinétiques de séchage d'après les paramètres de transferts mesurés et simulés sur une planche de bouleau (Ouertani et al. 2024).

### Méthode inverse et approche prospective dans le modèle numérique

Le code a démontré sa capacité à trouver la meilleure trajectoire d'un paramètre de table de séchage selon les attentes de l'opérateur (Fig. 3a). De plus, il peut estimer les paramètres de transfert en entrée d'après la cinétique de séchage mesurée (Fig. 3b) ; avec la seule mesure de MC à cœur l'analyse inverse a trouvé des paramètres proches des valeurs mesurées, qui permettent donc au code de reproduire assez fidèlement l'évolution des profils de MC d'une planche au cours du séchage, comparée aux mesures réalisées au densitomètre à rayons X. L'analyse inverse peut aussi être réalisée à partir des teneurs en eau à cœur mesurées par des sondes résistives, ce qui représente une opportunité, pour les sécheurs industriels, de caractériser le matériau en cours de séchage, et donc potentiellement d'optimiser la conduite du séchage selon la charge réelle. Cette méthode réussit à trouver des paramètres d'entrée même avec une petite portion de la cinétique de séchage, ce qui fera l'objet d'une publication prochaine.

Par ces modélisations, par apprentissage et prédiction en cours de séchage, il pourrait être possible de gérer des aléas en cours de séchage tels qu'ils pourraient survenir lors de l'utilisation d'énergie intermittente (EnR&R).

### Implémentation de ces deux approches dans un séchoir industriel

Cette partie présente des résultats obtenus avec le séchoir de FCBA. Au sein d'une pile de planches les cinétiques de séchage de 9 planches ont été mesurées (Fig. 4a). Il s'agit des seules informations connues sur l'ensemble de la centaine de planches séchées, et ne sont pas nécessairement représentatives de l'ensemble de la pile, tel que l'illustre la figure 4b. Les conduites de séchage optimisées doivent cependant être suffisamment robustes pour ne pas être trop sévères pour les planches qui s'éloignent fortement des planches instrumentées, en termes de MC et de propriétés de transfert.

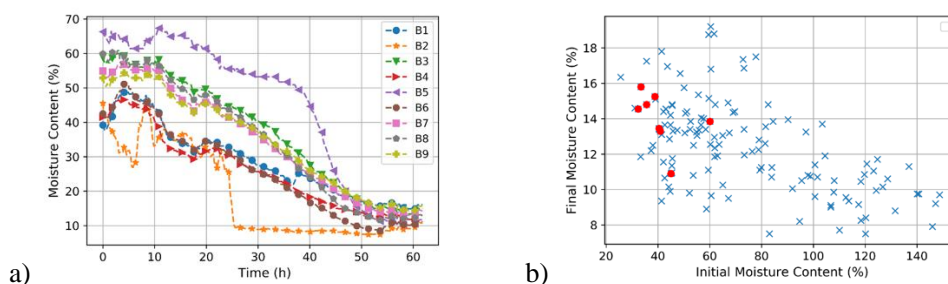


Fig. 4 : a) Cinétiques de séchage mesurées sur 9 planches instrumentées dans la charge de bois, b) teneurs en eau initiales et finales mesurées pour toutes les planches (les points rouges correspondent aux planches instrumentées).

### Perspectives

Pour le moment la stratégie d'optimisation du modèle est basée sur les conduites traditionnelles, qui augmentent généralement la température et diminuent l'humidité d'équilibre avec la diminution de MC. L'utilisation d'énergie intermittente va nécessiter de complètement revoir cette stratégie. Pour le modèle numérique, l'historique de séchage est contenu dans le matériau par ses champs de MC, déformations mémoires et contraintes. Cependant, au cours du séchage, l'horizon de calcul du code, dans son choix d'évolution des paramètres (température, humidité de l'air, vitesse d'air, apport énergétique auxiliaire) peut se réduire si les conditions de séchage étaient trop sévères en début de séchage. La question de la stratégie d'optimisation à adopter dans le cas d'énergies fluctuantes, dont la prévision va de quelques jours pour les énergies renouvelables à quelques semaines pour les énergies de récupération, est donc déterminante. D'autant plus que la qualité finale du processus dépend de l'ensemble de toute l'histoire vue par le matériau au cours du séchage. Deux stratégies vont pour le moment être explorées dans nos travaux futurs pour répondre à cette question, en considérant une énergie prévisible à court terme :

- L'énergie est stockée et le séchage se poursuit si possible dans les mêmes conditions. Cette stratégie ne présente pas de risques pour la qualité finale, et permet de compenser les aléas de l'approvisionnement énergétique, au détriment de son empreinte environnementale.
- Toutes les énergies disponibles à l'instant  $t$  sont utilisées pour accélérer le séchage. La durée est potentiellement réduite mais cela présente des risques en cas de ruptures dans l'approvisionnement énergétique et peut limiter les possibilités futures par un séchage trop sévère. Cette approche repose sur la capacité du modèle à savoir ce qui peut être réalisé sans compromettre la qualité finale du bois séché.

La prise en compte de l'hétérogénéité des planches est aussi nécessaire, et permettrait de réaliser l'optimisation sur des charges de bois aux propriétés contrastées. Différents scénarios énergétiques devraient aussi être générés, afin de trouver les scénarios critiques ; le code pourrait alors sélectionner la solution la plus robuste pour ces différents scénarios, dans un nuage de solutions autour d'un objectif.

### Conclusion et perspectives

Ce papier synthétise plusieurs travaux qui montrent l'avancée vers une utilisation optimale d'énergies fluctuantes dans le séchage du bois. Il s'agit d'étapes intermédiaires dans le développement d'un automate de régulation avancé pour le séchage du bois, basé sur un modèle déterministe. Le potentiel de cette approche est important et plusieurs résultats ont été présentés. Enfin des questions, des limites et des perspectives prometteuses ont été exposées.

## Remerciements

L'ADEME et FCBA financent cette thèse et sont ici remerciés pour leur soutien.

## Références

- Aghbashlo M, Hosseinpour S, Mujumdar A S (2015) Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review. *Drying Technology*, 33 (12), 1397–1462.
- Allegretti O, Cuccui I, Ferrari S, Sione A (2012) Dtouch – Drying Has Never Been so Easy. In *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products*, The Final Conference of COST Action E53, 4-7th May 2012, Edinburgh, p 9.
- Bailly O, L'Hostis C, Guennec T, Ackermann S (2020) Energie solaire : apports thermique et électrique complémentaires pour les séchoirs de bois d'œuvre, FCBA, 58 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 (4), 333.
- Luna D, Nadeau J-P, Jannot Y (2009) Solar Timber Kilns: State of the Art and Foreseeable Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6), 1446–1455.
- Ouertani S, Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024) Evaluating Moisture Transfer Properties of Wood by Inverse Analysis of Moisture Content Profiles Determined during Drying by X-Ray Attenuation. *Drying Technology*, 42 (1), 168–181.
- Perré P, Rémond R (2006) A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation. *Drying Technology*, 24 (9), 1069–1074.
- Perré P, Rémond R, Aléon D (2007) Energy Saving in Industrial Wood Drying Addressed by a Multiscale Computational Model: Board, Stack, and Kiln. *Drying Technology*, 25 (1), 75–84.
- Perré P, Turner I W (1999) TransPore: A Generic Heat and Mass Transfer Computational Model for Understanding and Visualising the Drying of Porous Media. *Drying Technology*, 17 (7–8), 1273–1289.
- Rémond R, Passard J, Perré 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 - A/Solids*, 26 (3), 558–572.
- Salin J-G (2001) Determination of the Most Economical Drying Schedule and Air Velocity in Softwood Drying. COST Action E15, 11-13th June 2001, Helsinki, Finland, p10.
- Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024a) Mechanistic-Based Probabilistic Optimization of Industrial Wood Drying Considering Energy Consumption, Process Duration, Quality and Cost. *Drying Technology*, 0 (0), 1–10.
- Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024b) Fork and Flying Wood Tests to Improve Prediction of Board Stress Development during Drying. In *Hardwood Conference Proceedings*, 30-31st May 2024, Sopron, Hungary.
- Wang X G, Liu W, Gu L, Sun C J, Gu C E, de Silva C W (2001) Development of an Intelligent Control System for Wood Drying Processes. In *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*, Vol. 1, pp 371–376.



## Contribution au diagnostic mécanique d'une structure en bois du patrimoine

BOUHLEL Sarra<sup>1</sup>, COINTE Alain<sup>1</sup>, MAURIN Emmanuel<sup>2</sup>, HISTACE Aymeric<sup>3</sup>,  
MELINGE Yannick<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux

<sup>2</sup>Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), CRC - MNHN, CNRS,  
Ministère de la Culture - UAR 3224

<sup>3</sup>Equipe Traitement de l'Information et Systèmes (ETIS), UMR 8051, CY Cergy Paris  
Université, ENSEA, CNRS  
[sarra.bouhleb@u-bordeaux.fr](mailto:sarra.bouhleb@u-bordeaux.fr)

**Mots clés :** Patrimoine bois ; Diagnostic ; Lois de similitude ; Séchage ; Mécanosorption ; Assemblage bois-bois ; Monitoring

### Contexte et objectifs

L'évaluation de la santé structurale d'un patrimoine en bois est très complexe. Seule l'expérimentation permet d'en obtenir une évaluation fiable. Toutefois, les essais à taille réelle s'avèrent souvent peu concluants, coûteux et parfois même irréalisables. Dans ce projet, la solution alternative consiste à mettre en place une maquette à échelle réduite du rez de chaussée de la « Halle de Villeréal » (Fig. 1), située dans le département du Lot-et-Garonne.



Fig. 1 : Vue 3D de la Halle de Villeréal à l'échelle 1/1      Fig. 2 : Vue 3D du modèle réduit à l'échelle 1/3

L'inspection visuelle de cet édifice patrimonial du XVI<sup>e</sup> siècle, construit en bois de chêne à l'état vert, révèle divers désordres, tels que la dégradation de certains éléments, une fissuration dans une poutre de l'enrayure et la détérioration d'assemblages, notamment la rupture de chevilles d'assemblage poteau-poutre de type tenon-mortaise. La préservation de ce patrimoine en bois, ainsi que la garantie de sa résistance et de sa durabilité, demeurent un défi scientifique. Cela est principalement dû au manque d'informations sur le matériau existant, son histoire, ainsi qu'aux limites des outils de diagnostic disponibles.

Dans le cadre d'une inspection approfondie visant à mieux comprendre les causes des désordres observés et à évaluer la tenue mécanique de la « Halle de Villeréal », une maquette en bois de chêne vert a été mise en place dans le département de la Gironde, tout en prenant en compte les effets d'échelle (Fig. 2). Le suivi des déformations dans la maquette, a mis en lumière des phénomènes complexes, tels que le processus de séchage du bois et son impact sur les déformations différées, qui influencent la stabilité structurale de l'édifice, tant au niveau des assemblages que des éléments porteurs. Ces phénomènes sont analysés dans le projet d'article.

## Matériel et méthode

### *Conception de la maquette*

Dans nos travaux, la capacité d'accroître l'expertise des assemblages en bois et de mieux diagnostiquer passe par la réalisation d'une maquette du rez de chaussée de la « Halle de Villeréal », conçue selon des lois de similitude. Ces lois permettent d'établir des relations qui lient la réponse du modèle réduit à celle du prototype à l'aide de facteurs d'échelle. Chaque facteur d'échelle exprime le rapport d'une variable physique du modèle ( $x_m$ ) et son équivalent du prototype ( $x_p$ ), selon la relation  $\lambda_x = \frac{x_m}{x_p}$  (Szucs 1980).

L'analyse dimensionnelle permet d'établir les relations de similitude selon le principe suivant : Deux systèmes peuvent être considérés comme semblables si leurs paramètres adimensionnels, ou paramètres de similitude, sont identiques et restent invariables par changement d'échelle. Elle montre que dans un modèle statique élastique, où les facteurs indépendants choisis sont le facteur d'échelle géométrique  $\lambda_L = 1/3$  et celui de module d'Young  $\lambda_E = 1$  (conservation des propriétés du matériau), les facteurs d'échelle pour les variables d'intérêt (chargement surfacique ( $q$ ), contrainte ( $\sigma$ ) et déplacement ( $u$ )) sont les suivants (Harris et Sabnis 1999) :

$$\begin{cases} \lambda_E = \lambda_\sigma = 1 \\ \lambda_E = \lambda_q = 1 \\ \lambda_u = \lambda_L = 1/3 \end{cases}$$

Une charge a été appliquée à l'aide d'une citerne souple couvrant une surface de  $4,44 \times 4,77 \text{ m}^2$  et un volume d'eau de  $10,3 \text{ m}^3$ , soit une charge équivalente à  $486 \text{ kg/m}^2$ . Cette charge surfacique est équivalente à celle appliquée sur le plancher du rez-de-chaussée de la structure réelle « Halle de Villeréal », qui mesure environ 14,5 m de côté et 4,8 m de hauteur. La maquette, également de forme carrée avec des côtés d'environ 4,8 m et 1,7 m de hauteur, repose sur des poteaux disposés selon deux carrés concentriques.

### *Instrumentation et monitoring de la maquette*

Cette approche expérimentale repose sur l'application d'un chargement surfacique au plancher d'une maquette exposée à un environnement climatique réel. Chaque élément de la structure subit ainsi des sollicitations mécaniques et hydriques. La nature des contraintes mécaniques varie en fonction de la transmission de la charge, de la position et du rôle de chaque élément dans la structure, ainsi que de l'orientation des fibres du bois par rapport à la direction de la charge. Comme l'illustre la Fig. 2, le bois du carré externe, directement exposé aux fluctuations climatiques, relève de la classe de service 3, tandis que le portique intérieur, étant couvert, est soumis à des conditions moins sévères correspondant à la classe de service 2.

Cette méthodologie permet d'évaluer la réponse des éléments structurels de la maquette, installée depuis six mois, tout en assurant un suivi par monitoring jusqu'à fin 2025. Elle vise également à caractériser le comportement des assemblages traditionnels face aux sollicitations mécaniques et aux variations climatiques. Ainsi, le dispositif expérimental mis en place comprend les éléments suivants :-

- Capteurs de mesure : 18 capteurs potentiométriques de référence MMR10 ont été installés pour mesurer les déplacements relatifs entre les différents composants de la structure. En complément, 2 capteurs ont été mis en place pour enregistrer les déplacements absolus (flèches).

- Capteurs environnementaux : 2 capteurs de température et d'humidité de référence HTM2500LF, ont été disposés en des points stratégiques afin de suivre les conditions environnementales de l'air ambiant.
- Système d'acquisition des données : une centrale d'acquisition (imc SPARTAN) et un logiciel de pilotage automatisé (imc STUDIO) ont été configurés pour enregistrer les données toutes les deux secondes.
- Traitement et analyse des données : le logiciel MATLAB a été utilisé pour traiter et analyser les données collectées comprenant des mesures de déplacement, de température et d'humidité.

Le positionnement des capteurs a été défini en fonction des zones présentant des pathologies observées sur la « Halle de Villeréal », comme illustré dans les Fig. 3 à 6.



Fig. 3 : Rupture des clefs dans l'assemblage tenon-mortaise entre poteau et poutre



Fig. 4 : Capteurs 06 et 07 de mesures des déplacements relatifs entre poteau et poutres de la travée extérieure



Fig. 5 : Illustration de l'endommagement mécanique dans des poutres portant le rez de chaussée



Fig. 6 : Déplacements verticaux enregistrés par les capteurs 05 et 18, positionnés aux extrémités des poutres de l'enrayure

## Résultats et discussion

Au cours de la période analysée, l'humidité relative ambiante a varié entre 21,58% et 100%, tandis que la température a fluctué entre 7,52 °C et 32,1 °C. La charge appliquée était constante, et le temps de chargement s'est étendu du 28 mars 2024 jusqu'à présent.

Les données expérimentales présentées dans la section suivante couvrent une période de 150 jours, allant du 28 mars au 31 août.

Le monitoring de la déformation de certains éléments au sein de la maquette révèle un retrait dans quelques poutres du plancher. L'évolution du retrait de ces poutres (Fig. 7) suit une cinétique caractéristique d'un phénomène de fluage, marquée par une phase transitoire où la vitesse de déformation diminue, suivie d'une phase secondaire à vitesse stable. La Fig. 8 met en évidence un déplacement particulièrement prononcé, mesuré par le capteur 08, illustrant le retrait tangentiel de la poutre A1 du plancher, dont la section est présentée dans la Fig. 9a. Ce déplacement, atteignant environ 3,5 mm, est presque deux fois supérieur à ceux relevés par les capteurs 09, 16 et 17 (environ 1,9 mm). Le capteur 09 est dédié à la mesure du retrait transversal de la poutre A2 (Fig. 9b), tandis que les capteurs 16 et 17 mesurent le retrait radial de la poutre

A3 (Fig. 9c). Ces observations soulignent une différence significative entre les retraits tangentiels et radiaux au sein de la structure.

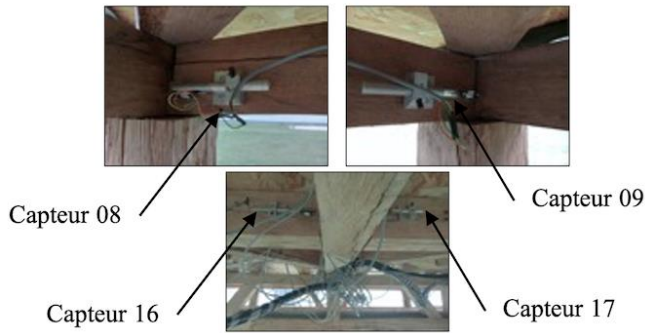


Fig. 7 : Disposition des capteurs pour la mesure des variations dimensionnelles transversales

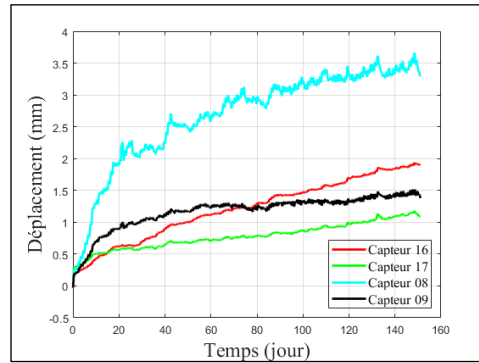


Fig. 8 : Évolution du retrait transversal des éléments structuraux au cours du temps

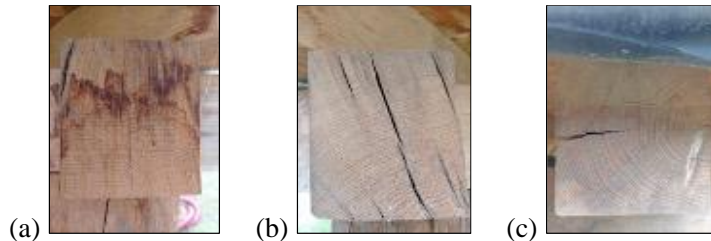


Fig. 1 : Sections transversales : (a) poutre A1 ; (b) poutre A2 ; (c) poutre A3

En outre, le monitoring du comportement mécanosorptif a été réalisé à travers l'analyse des flèches enregistrés par les capteurs 12 et 20. Ce comportement résulte du couplage entre la contrainte mécanique (flexion des poutres) et les variations d'humidité. L'étude met en évidence l'effet élastique instantané lors du chargement initial, la variation du module due à la variation de l'humidité relative, la déformation hydrique et l'évolution viscoélastique sous charge constante, amplifiée par l'effet mécanosorptif. Ce dernier se traduit par une augmentation de la déformation pendant les phases d'humidification, liée à l'assouplissement progressif des propriétés élastiques sous l'effet de la diffusion du front d'humidité. Il se manifeste également par le phénomène d'hygro-verrou (Fig. 10 et 11), caractérisé par un blocage partiel et temporaire des déformations élastiques en raison de la rigidification du matériau pendant les phases de séchage sous contrainte, suivi d'une reprise du fluage au cours de la phase de ré-humidification (Gril 1988, Dubois et al 2005, Saifouni 2014, Nguyen 2017).

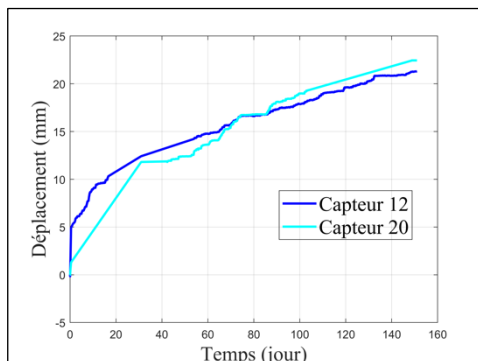


Fig. 10 : Évolution temporelle des mesures des flèches enregistrées par les capteurs 12 et 20

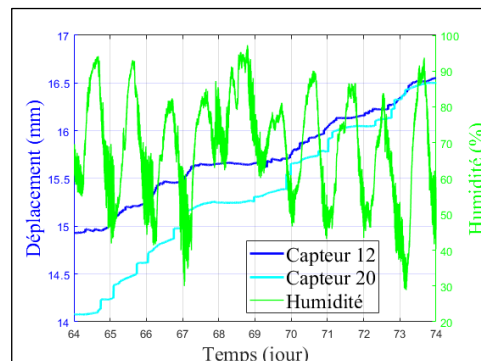


Fig. 11 : Effet des variations d'humidité sur le comportement mécanosorptif

La Fig. 10 révèle que les flèches mesurées pour les deux poutres de section 9x10 cm<sup>2</sup> de la travée intérieure, atteignent environ 23 mm après 150 jours. Cette déformation entraîne une

compression de la fibre supérieure et une traction de la fibre inférieure de chaque poutre. Par ailleurs, elle induit une rotation au niveau des zones d'assemblage tenon-mortaise entre le poteau d'angle de section 13x13 cm<sup>2</sup> et la poutre. Cela provoque un double cisaillement des chevilles aux interfaces entre les joues du tenon et celles de la mortaise. Ce mode de déformation, par cisaillement des chevilles, constitue généralement le mécanisme principal de rupture de l'assemblage (Fig. 12 et 13).



Fig. 12 : Flexion de la poutre appuyée sur deux poteaux dans la travée intérieure

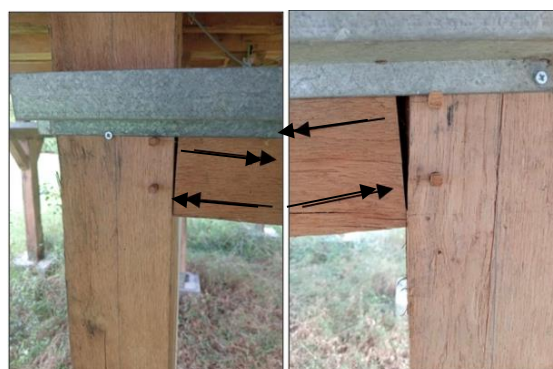


Fig. 13 : Rotation de la zone d'assemblage sous l'effet de la flexion

Pour caractériser l'effet de la variation d'humidité sur le comportement des assemblages tenon-mortaise chevillés entre les poteaux d'angle et les poutres, ainsi qu'entre les poteaux centraux et les poutres, des capteurs de déplacement relatif sont utilisés. Ces dispositifs sont conçus pour mesurer principalement les jeux causés par les variations dimensionnelles transversales (retrait/gonflement) du poteau, ainsi que par le retrait longitudinal de la poutre, qui est nettement moins prononcé (Guitard 1987).

L'évolution des jeux dans les assemblages poteau-poutre révèle des variations plus importantes, atteignant jusqu'à 1,8 mm, notamment au niveau des capteurs 13 et 14 qui mesurent le déplacement relatif dans la travée intérieure. En comparaison, les capteurs 01 et 03, situés dans la travée extérieure, enregistrent des variations ne dépassant pas 0,4 mm (Fig. 14 et 15). Cette différence peut s'expliquer par la cinétique de séchage, les assemblages de classe 2 (travée intérieure) séchant plus rapidement que ceux de classe 3 (travée extérieure). Par ailleurs, la flexion est plus marquée dans la travée intérieure, où les poutres reposent sur deux poteaux, tandis que dans la travée extérieure, la présence de trois appuis réduit cet effet.

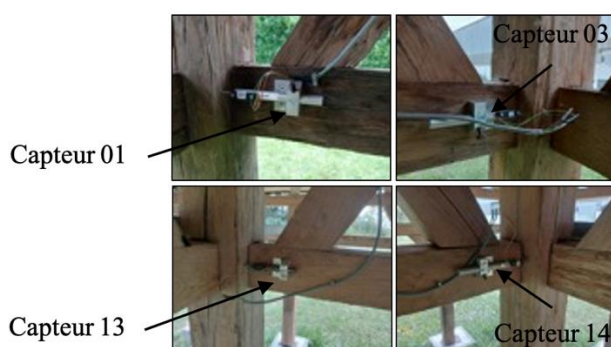


Fig. 14 : Disposition des capteurs entre le poteau d'angle et la poutre

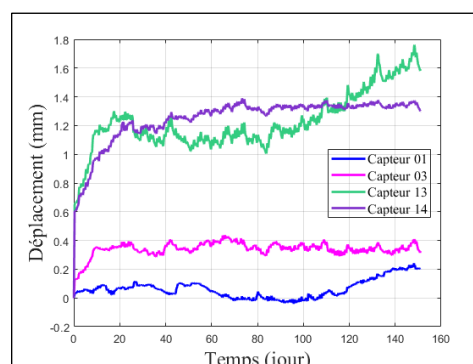


Fig. 15 : Évolution du déplacement relatif dans les assemblages poteau-poutre au cours du temps

L'analyse des assemblages révèle une sensibilité significative aux variations hygrométriques, se manifestant par des fluctuations cycliques liées aux phénomènes de retrait et de gonflement libre du bois. Dans la travée intérieure, l'évolution du déplacement relatif entre poteau et poutre

au niveau des assemblages est amplifiée par un double effet : d'une part, la rotation induite par la flexion de la poutre, et d'autre part, l'influence mécanosorptive qui accentue cette flexion. En revanche, cette sollicitation en flexion est limitée dans les assemblages de la travée extérieure où la présence d'un potelet à mi-travée joue un rôle stabilisateur, empêchant ainsi les déformations excessives. Cette différence de comportement souligne l'importance de la configuration structurelle dans la réponse des assemblages aux variations environnementales et aux contraintes mécaniques.

### **Conclusion et perspectives**

Le diagnostic du comportement mécanique différé d'une structure en bois nécessite une analyse approfondie des assemblages et de la stabilité des éléments structurels, en intégrant les effets des charges à long terme et des variations climatiques. Le couplage thermo-hygro-mécanique, notamment à travers l'effet d'hygro-verrou, accentue la flexion de la poutre portant le tenon, ce qui intensifie la sollicitation en double cisaillement sur les chevilles au niveau des interfaces latérales dans les assemblages de type tenon et mortaise. Ce processus peut engendrer une dégradation prématurée des assemblages.

Bien que le séchage du bois puisse provoquer des fissures importantes dans les éléments structuraux, il reste essentiel d'évaluer la réponse dynamique de la structure à travers une analyse modale expérimentale. Cette approche globale, qui intègre l'étude des contraintes mécaniques, des effets hygroscopiques et des sollicitations dynamiques, permet de garantir la durabilité des ouvrages en bois tout au long de leur cycle de vie, en anticipant et en prévenant les divers facteurs pouvant compromettre leur intégrité structurelle à long terme.

### **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-rhéologique du bois à partir de sa microstructure, Thèse de doctorat de l'université Paris 6.
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*, CEPADUES- Editions.
- Harris HG, Sabnis GM (1999) *Structural modeling and experimental techniques* (2nd ed.). CRC Press.
- Miller JF, Schmidt RJ, Bulleit WM (2010) New yield model for wood dowel connections. *Journal of Structural Engineering*, 136(10) :1255–1261.
- Nguyen SL (2017) *Modélisation hydromécanique du bois : Application au sapin blanc du Massif Central*, thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne.
- Saifouni O (2014) *Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux : application au comportement mécanosorptif du bois*, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal.
- Szucs E (1980) *Similitude and modelling*. Elsevier, NY.
- Tevi KR (2023) *Méthodologie d'évaluation de la santé structurelle d'une structure bois du Patrimoine : étude de la halle de Villeréal*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux.

## Contribution of oak tree-ring width and stable isotopes to reconstruct hydroclimate variability in central France over the last millennium

HUREAU Charlie<sup>1,2</sup>, DAUX Valérie<sup>2,3</sup>, GUILLET Sébastien<sup>4</sup>, BLONDEL François<sup>4</sup>,  
PIERRE Monique<sup>2</sup>, STIEVENARD Michel<sup>2</sup>, LEBOURGEOIS François<sup>5</sup>, LAVIER  
Catherine<sup>6</sup>, DUMONT Annie<sup>7</sup>, PERRAULT Christophe<sup>8</sup>, LE DIGOL Yannick<sup>9</sup>,  
COUTURIER Yann<sup>9</sup>, REGNIER Edouard<sup>2</sup>, GAUTIER Emmanuèle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, France & Laboratoire de Géographie Physique (LGP), UMR 8591 CNRS/UP1/UPEC, Thiais, France

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), UMR 8212 CEA/CNRS/UVSQ, Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup>Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Versailles, France

<sup>4</sup>Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene (C-CIA), Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Genève, Suisse

<sup>5</sup>Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, Silva, Nancy, France

<sup>6</sup>Ministère de la Culture (C2RMF), Paris, France & Laboratoire Technologie et Ethnologie des Mondes Préhistoriques (TEMPS), UMR 8068 CNRS/UP1/UPN, Nanterre, France

<sup>7</sup>Ministère de la Culture (DRASSM), Marseille, France & Laboratoire Archéologie, Terre, Histoire et Sociétés (ARTEHIS), UMR 6298 CNRS/UB/MC, Dijon, France

<sup>8</sup>Centre d'Études en Dendrochronologie et de Recherche en Écologie et paléoécologie (CEDRE), Besançon, France

<sup>9</sup>Dendrotech, Betton, France

[charlie.hureau@cnrs.fr](mailto:charlie.hureau@cnrs.fr)

**Key words:** climate variability; paleoclimate; tree-ring width;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta^{13}\text{C}$ ; oak; central France

### Context and objectives

To better understand current global warming, it is crucial to document natural climate variability during the pre-industrial period. This helps to characterize the patterns of variability and identify the forcings driving it, assess the accuracy of the variability simulated by climate models, and determine the role of anthropogenic effects (IPCC 2021).

In Europe, tree-ring width (TRW) and maximum latewood density (MXD) series have been widely used to reconstruct temperature variations over the past millennium, particularly in high-altitude or high-latitude regions (e.g. Briffa et al 1992; Corona et al 2010). At lower altitudes, tree growth is more controlled by drought and precipitation, making these records valuable for characterizing hydroclimate variability (e.g. Büntgen et al 2011, Cook et al 2016, Cooper et al 2013). However, these tree-ring series are affected by age-related effects and stand dynamics trends, requiring standardization procedures that can impact the low-frequency component of the signal (see Helama et al 2017, for a review). The dendroisotopic approach, which is based on the determination of the oxygen and carbon isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) in tree-ring cellulose, partly overcomes the issues associated with conventional tree-ring measurements. These isotopic proxies are highly sensitive to water stress, yet they are less affected, or even unaffected, by age-related growth effects. However, although numerous multi-century reconstructions exist across Europe (e.g. Büntgen et al 2021, Treydte et al 2024) and specifically in France (Etien et al 2008, Labuhn et al 2016), there are no millennial

reconstructions based on stable isotopes or tree-ring widths at low altitudes in France. This is notable given that these areas have long been inhabited by human societies for centuries.

Our goal is to deepen the understanding of past climate variability at the regional scale, where changes are more pronounced, by producing the first millennial scale tree-ring width chronology for central France. In parallel, we aim to construct a cellulose  $\delta^{18}\text{O}$  chronology covering the period 1200-1400 CE, which will help define the climatic transition between the relative warming of the Medieval Climate Anomaly (MCA; ~950-1250 CE) and the cooling of the Little Ice Age (LIA; 1350-1850 CE).

## Material and methods

### Tree-ring width data

Thirty-three tree-ring width chronologies from living oaks, spanning a large area of central France (46-48.5°N, -1.5-7.5°E), were selected from both published (e.g. Lebourgeois et al 2004, 2015, Mérian et al 2011, Pilcher 1996) and unpublished sources (Fig. 1). In addition, three new chronologies were developed. Samples preparation, measurement and dating were conducted at LGP using Coorecorder and CDendro (Larsson 2005).

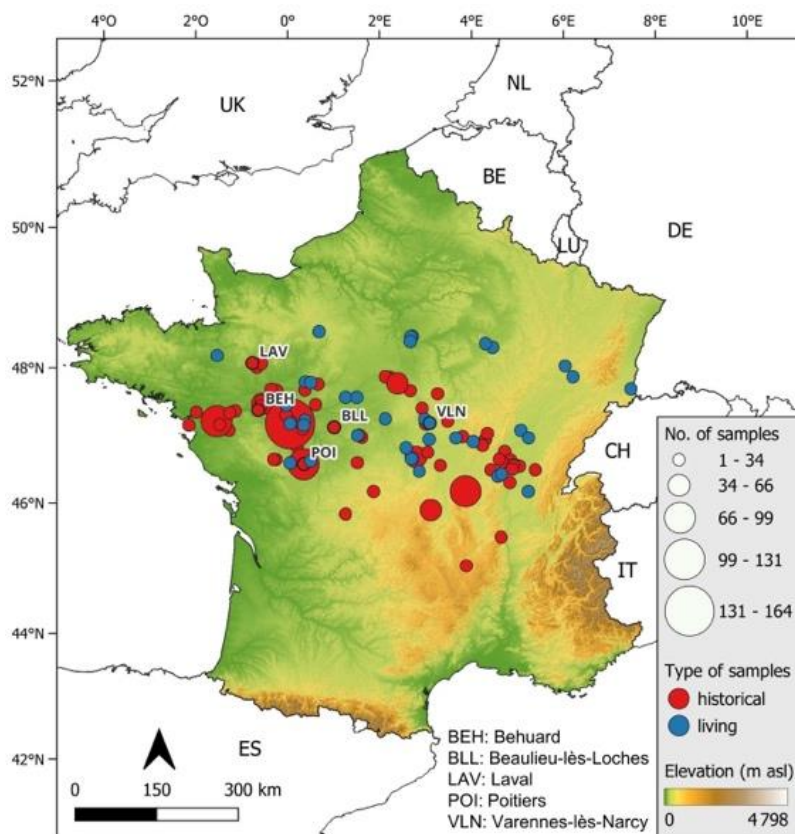


Fig. 1: Tree-ring width (TRW) and stable isotope (TRSI) series studied. TRSI series sites are indicated by labels. The dataset consists of 1,523 series grouped in 141 site chronologies.

To cover the last millennium, we leveraged a vast corpus of wood (> 3,000 series) from historic buildings as well as archaeological remains including ancient bridges, mills, fisheries, etc. excavated from the Loire River bed (e.g. Dumont et al 2014). Here, we present the temporal distribution of the initial data, comprising more than 1,400 individual tree-ring width series that already cover the defined spatiotemporal framework (Fig. 2). These data have been generously provided by French dendroarchaeologists.



### Tree-ring stable isotope data

Among the living trees cored at the VLN site (Fig. 1), the tree-ring latewood from 9 cores was cut with a scalpel over the period 1910-2023. The tree rings were then pooled by year, and  $\alpha$ -cellulose from each year was chemically extracted. The isotopic analyses were conducted at LSCE.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  of  $\alpha$ -cellulose was measured by pyrolysis with a high-temperature conversion elemental analyzer (vario PYRO cube) coupled to a mass spectrometer (IRMS, isoprime precisION). Each cellulose sample was measured at least twice. A cellulose reference material (Whatmann CC31) was included in the analysis sequences to correct for analytical drift and normalize the data to internationally accepted standards. The long-term analytical precision based on repeated measurements of CC31 cellulose was within 0.2‰ for  $\delta^{18}\text{O}$  and 0.1‰ for  $\delta^{13}\text{C}$ . For the period 1200-1400 CE, the same protocol was followed. Five cores from 4 sites (BLL, BEH, LAV and POI; Fig. 1) with at least 30y-overlap periods, were included in the isotopic chronology.

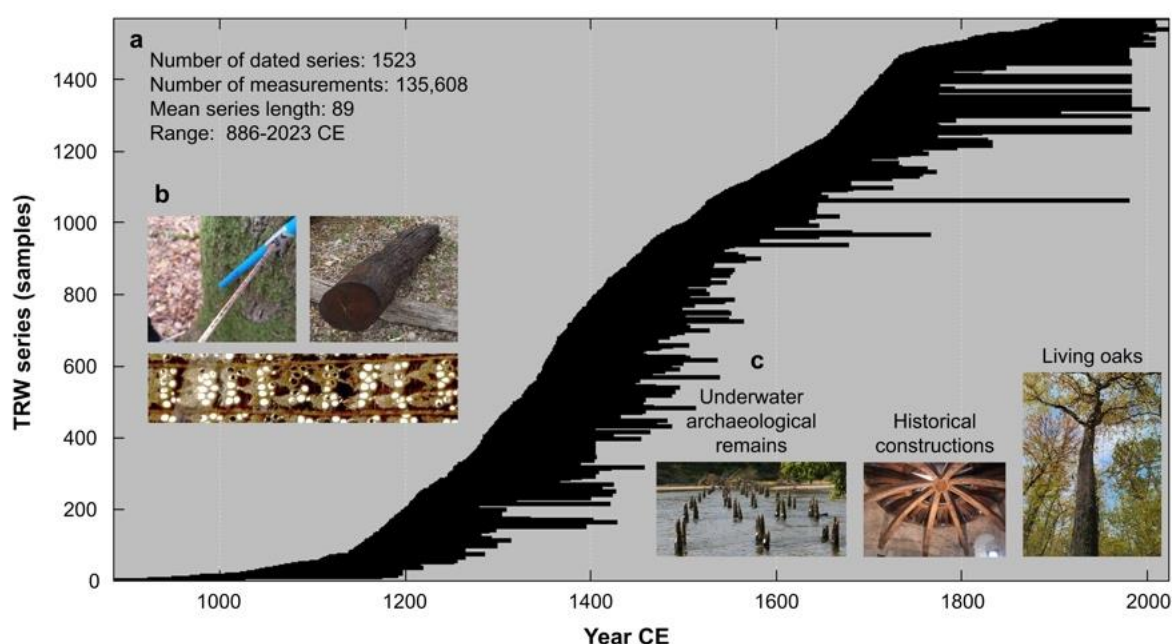


Fig. 2: Sample distribution of the central France dataset. a) Temporal coverage of 1,523 living, historical and archaeological oaks along with their dataset statistics. b) Coring of living trees, an example of a bridge pier extracted from the Loire River and a microscopic view of a sessile oak showing a sequence of annual tree rings. c) The various types of oak samples analyzed in this study.

### Climate-growth relationships

Temperature (T, Tmax, Tmin) and precipitation (PRE) data from the CRU TS4.08 were extracted at the nearest grid point (0.5° resolution) for each chronology ([crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_4.08/](http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.08/)). Standardized Precipitation-Evapotranspiration Indexes (SPEI) were also obtained ([spei.csic.es/](http://spei.csic.es/)). The relationships between TRW and TRSI chronologies and monthly or seasonal instrumental data and SPEI were assessed using bootstrapped Pearson correlations for the period 1910-2023.

### First results

We present here the methodological framework of this work along with the initial findings on growth-climate relationships during the instrumental period. The climate sensitivity of the 3 proxies (TRW,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) has been evaluated. Notably, the strong correlation between the June-July SPEI and cellulose  $\delta^{18}\text{O}$  ( $r = -0.75$ ), combined with model verification, indicates that

$\delta^{18}\text{O}$  is the most reliable proxy for reconstructing past hydroclimatic variability (Fig. 3). In contrast, TRW seems to be controlled more by the March-July SPEI and precipitation ( $r = 0.61$ ).

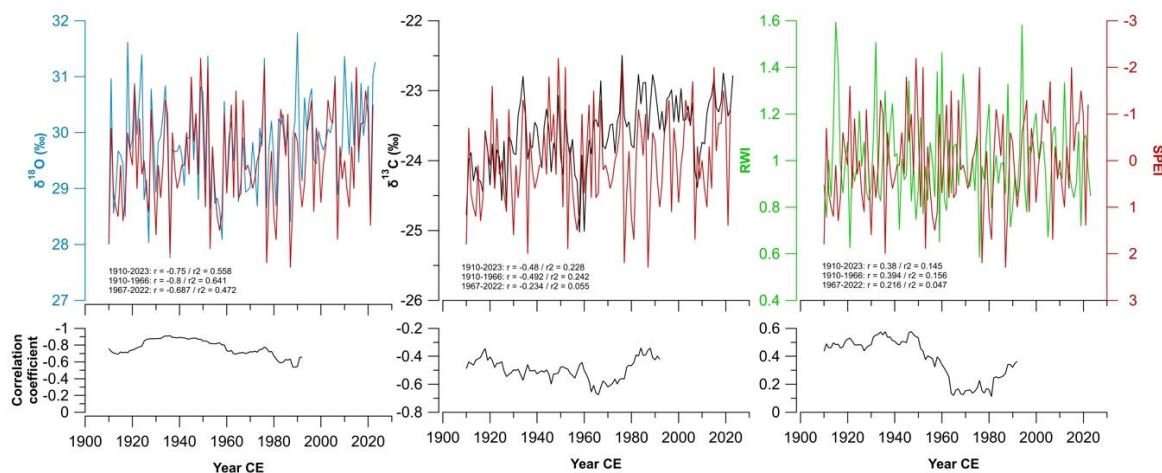


Fig. 3: Relationship between the,  $\delta^{13}\text{C}$ , ring width index (RWI) series and the June-July SPEI over the period 1910-2022. Thirty-one-year moving correlations have been calculated to assess the signal stability. Note that the SPEI axis is reversed, meaning that upward values indicate warm and dry years.

## Conclusion and perspectives

The observed correlations between the proxies and instrumental data indicate the potential to reconstruct past hydroclimatic variability. Dry and wet periods can be reconstructed over the last millennium from TRW using the vast corpus of archaeological wood studied, as well as from cellulose  $\delta^{18}\text{O}$  during the period 1200-1400 CE. This will provide new data on both climatic long-term variability and the MCA-LIA transition at low altitude in France.

## Acknowledgements

Tree-ring isotopic analyses performed at LSCE was funded by Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (CCCLIP project) and LTSER Zone Atelier Loire (PALEOCLIMED project). We thank the Office National des Forêts (ONF) at Bertranges for authorizing the tree sampling, and particularly Mr. Cyril Gilet for his support.

## References

- Briffa KR, Jones PD, Bartholin TS, Eckstein D, Schweingruber FH, Karlén W, Zetterberg P, Eronen M (1992) Tree-ring density reconstructions of summer temperature patterns across Western North America since 1600. *Journal of Climate*, 5, 735-754.
- Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan JO, Herzig F, Heussner KU, Wanner H, Luterbacher J, Esper J (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331(6017), 578-582.
- Büntgen U, Urban O, Krusic P, Rybníček M, Kolář T, Kyncl T, Ač A, Koňasová E, Čáslavský J, Esper J, Wagner S, Saurer M, Tegel W, Dobrovolný P, Cherubini P, Reinig F, Trnka M (2021) Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, 14, 190-196.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2391 p.

- Cook BI, Anchukaitis KJ, Touchan R, Meko DM, Cook ER (2016). Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5), 2060-2074.
- Cooper RJ, Melvin TM, Tyers I, Wilson RJS, Briffa KR (2013) A tree-ring reconstruction of East Anglian (UK) hydroclimate variability over the last millennium. *Climate Dynamics*, 40, 1019-1039.
- Corona C, Guiot J, Edouard JL, Chalié F, Büntgen U, Nola P, Urbinati C (2010) Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Climate of the Past*, 6(3), 379-400.
- Dumont A, Foucher M et al (2014) Évolution des ponts et du lit mineur de la Loire, entre la Charité-sur-Loire et la Chapelle-Montlinard. *Développement durable et territoires*, 5(3), 1-16.
- Etien N, Daux V, Masson-Delmotte V, Stievenard M, Bernard V, Durost S, Guillemin MT, Mestre O, Pierre M (2008) A bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from A.D. 1596 to 2000. *Climate of the Past*, 4, 91-106.
- Helama S, Melvin TM, Briffa KR (2017). Regional curve standardization: State of the art. *The Holocene*, 27(1), 172-177.
- Lebourgeois F, Cousseau G, Ducous, Y (2004) Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of Forest Science*, 61(4), 361-372.
- Lebourgeois F, Drénou C, Bouvier M, Lemaire J (2015) Caractérisation de la croissance des chênaies pédonculées atlantiques dépérissantes : effets des sécheresses et relation avec l'architecture des houppiers. *Revue Forestière Française*, 67(4), 333-351.
- Labuhn I, Daux V, Girardclos O, Stievenard M, Pierre M, Masson-Delmotte V (2016) French summer droughts since 1326 CE: a reconstruction based on tree ring cellulose  $\delta^{18}O$ . *Climate of the Past*, 12, 1101-1117.
- Larsson L. (2005). CDendro & Coorecorder program package, version 7.8.1 Dec 23 2014. <https://www.cybis.se/forfun/dendro>.
- Mérian P, Bontemps JD, Bergès L, Lebourgeois F (2011) Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology*, 212, 1855-1871.
- Pilcher JR (1996) Dendrochronological insights into past oak growth. *Annals of Forest Science*, 53(2-3), 663-670.
- Treydte K, Liu L, Padrón, RS et al (2024) Recent human-induced atmospheric drying across Europe unprecedented in the last 400 years. *Nature Geoscience*, 17, 58-65.

## Effet du vieillissement naturel sur les propriétés physicomécaniques du bois de chêne de la cathédrale Notre Dame de Paris

BOURCHANIN Matteo<sup>1,2</sup>, NOUEMSI SOUBGUI Epiphane<sup>3,4</sup>, MATSUO-UEDA Miyuki<sup>2,5</sup>,  
SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>, GUIBAL Daniel<sup>6</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,7</sup>, GRIL Joseph<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal,  
Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>RISH, Kyoto University, Japan

<sup>3</sup>Local Mat. Promotion Authority/MIPROMALO/MINRESI, Nkolbikok, Yaoundé, Cameroun

<sup>4</sup>Laboratory Engineering Civil and Mechanics, National Advanced School of Engineering,  
Université de Yaoundé, Cameroun

<sup>5</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan

<sup>6</sup>UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier

<sup>7</sup>CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon

<sup>8</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand

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

**Mots clés :** Chêne ; Vieillissement ; Appariement ; Comportement mécanique ;  
Hygroscopicité ; Réutilisation.

### Contexte et objectifs

La connaissance des propriétés du vieux bois est nécessaire à la prise de décision des ingénieurs confrontés au remplacement d'éléments de structure issus de la déconstruction de bâtiments anciens ou à l'entretien d'un monument historique. Des recherches menées au Japon à partir de bois récupérés de bâtiments traditionnels (Kohara 1958) ont mis en évidence un certain nombre de tendances dans l'effet du vieillissement naturel : dégradation des polysaccharides, noircissement (Matsuo et al 2011), peu d'effet sur la rigidité voire la résistance, diminution de l'énergie de rupture, notamment dans le sens transversal au fil (Yokoyama et al 2009). De telles recherches se heurtent à deux difficultés majeures : l'obtention d'échantillons bien identifiés de vieux bois et la variabilité intrinsèque du matériau. Le vieillissement dont il est ici question est l'oxydation lente en volume, indépendamment de l'effet supplémentaire de la dégradation de surface (altération) ou des dommages induits par des actions mécaniques ou hygromécaniques.

L'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris (NDP) fut une catastrophe qui a néanmoins permis de nombreuses avancées scientifiques. Notamment, les vestiges de la charpente, étudiés et datés avec l'ANR Casimodo, constituent un stock important de bois de chêne datant du XII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle et offrant une opportunité rare d'étudier les propriétés de vieillissement du bois. Dans le cas du bois de NDP, il faut également considérer l'effet du feu, qui se traduit par la présence d'une enveloppe de bois carbonisé autour des restes de poutres, et, sous cette enveloppe, de bois « torréfié » modifié par la chaleur en plus de l'âge.

Le projet en cours, financé par le CNRS, vise à caractériser l'évolution des propriétés physicomécaniques du bois de chêne. Piloté par l'Institut Pascal (France), il implique également des partenaires en France, au Japon et en Italie. Des échantillons de poutres référencées NDP ont été découpés et répartis entre les différentes équipes. Les résultats présentés ici ont été obtenus préalablement lors du stage de master de Bourchanin (2023), dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Pascal et l'Université de Kyoto.

## Matériel et méthodes

Deux lots, a et b, des échantillons de bois du XXI<sup>e</sup> siècle ainsi que des échantillons des XII<sup>e</sup>, XIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup>, XXI<sup>e</sup> siècles ont été utilisés, obtenus à partir de restes de poutres préalablement datées (Fig. 1) par dendrochronologie dans le cadre de l'ANR Casimodo (Penagos et al 2024). Les poutres partiellement carbonisées présentent une géométrie très variable (Fig. 2). Après découpe de rondelles tirées des extrémités de chaque tronçon de poutre, des blocs ont été usinés dans le sens R, avec une épaisseur T de 35 mm et des longueurs L et R variables. Les échantillons nécessaires aux différentes campagnes expérimentales seront prélevés par les divers partenaires dans ces géométries, permettant le positionnement par rapport à la moelle à chaque fois que cela est possible. Dans le cas des résultats préliminaires présentés ici, des échantillons L de dimensions 120 (L) x 20 (R) x 5 (T) mm et des échantillons R de dimensions 70 (R) x 10 (T) x 4 (L) mm ont été produits à partir de tels blocs.

Après stabilisation à 65% RH, 20°C, la densité (d) et la largeur des cernes (RW) des échantillons L et R ont été mesurées, ainsi que les paramètres de couleur (CIELab) au moyen d'un spectrocolorimètre. Puis des essais de flexion 3 points ont été effectués jusqu'à rupture : à partir de la courbe reliant la contrainte et la déformation maximales, le module d'Young (MOE) et la contrainte de rupture (MOR) ont été obtenus, ainsi qu'une estimation de l'énergie surfacique de rupture (G) en divisant l'aire sous la courbe par la section de l'échantillon.

La couleur a également été mesurée au moyen d'un spectrocolorimètre sur la face transverse des rondelles, ainsi que sur quelques carottes de sondage prélevées dans la charpente de NDP avant l'incendie en vue d'études dendrochronologiques.



Fig.1 : Exemple de section disponible



Fig. 2 : Illustration du plan de coupe des pièces à géométrie variable

## Premiers résultats

Pour les données de couleur telles que celles présentées dans la Fig. 3, la position est sans unité et correspond à l'ordre des mesures, espacées d'environ 5 mm ; cependant, la géométrie de l'échantillon rend parfois difficile la précision. Les profils de luminance ( $L^*$ ) montrent que l'effet du feu est limité à la surface : s'il avait atteint par diffusion l'ensemble du volume, un profil parabolique auraient été observé. Les emplacements internes peuvent donc être qualifiés de bois « intacts ». Les difficultés de mise en correspondance sont illustrées dans la Fig. 4, qui

montre que, si les 2 lots de bois du XXI<sup>e</sup> siècle choisis pour la comparaison sont proches des bois des XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles, les pièces du XIX<sup>e</sup> siècle sont assez différentes. Les différences de valeurs de MOE, Fig. 5, semblent donc davantage influencées par l'anatomie que par le vieillissement.

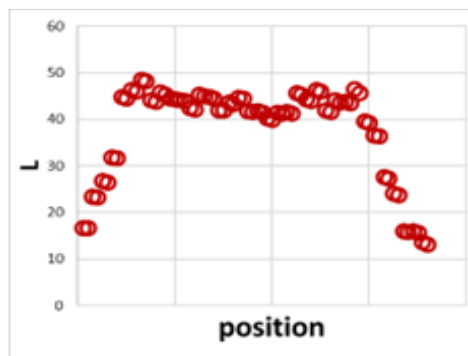


Fig. 3 : Luminance L\* en fonction de la position

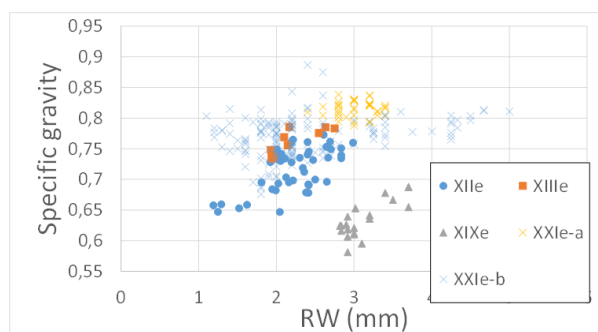


Fig. 4 : Relation entre la densité et la largeur des cernes en fonction de l'origine du bois

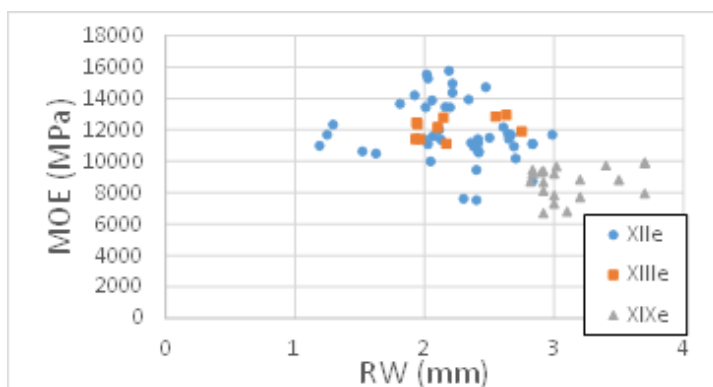


Fig. 5 : Relation entre le module d'élasticité et la largeur des cernes pour le bois ancien

### Conclusion et perspectives.

Les résultats présentés ici visaient notamment à 1- consolider les techniques de rapprochement pour comparer les bois anciens et récents, 2- évaluer les propriétés élastiques instantanées, 3- déterminer le comportement hygroscopique, 4- estimer les effets du vieillissement sur la rupture et le comportement dépendant du temps. La profondeur de perturbation de l'incendie a été évaluée à l'aide d'une analyse de couleur. Des essais préliminaires de flexion 3 points réalisés sur un petit nombre d'échantillons du XII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle ont mis en évidence la variabilité considérable de ce matériau et la nécessité de gérer un échantillon diversifié pour parvenir à des conclusions fiables. Les premiers essais permettent d'isoler les parties endommagées par le feu, afin de se concentrer sur le vieillissement naturel. Comparer les propriétés sur des échelles de temps aussi larges revient à faire correspondre l'anatomie d'échantillons de différentes époques. Les résultats futurs fourniront des informations sur le comportement hygroscopique et mécanique de ces bois. La diminution éventuelle de la teneur en eau d'équilibre résultant de la perte attendue d'hémicelluloses devrait également être étudiée.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNRS via le projet PEPS FuturVieuxBois, la Région AuRA et le Massif Central (fonds FNADT et FEDER) via le projet SAPIMAC pour leur soutien, le Summer Program de la JSPS pour la recherche menée au Japon, et les participants à l'ANR Casimodo (Olivier Girardclos, Benoit Brossier...) pour la datation et l'obtention du bois.

## Références

Bourchanin M (2023) Effect of time, heat and fire on the properties of oak, rapport de stage, Master Sciences du Bois, Univ. Montpellier.

Kohara J (1958) Study on the old timber, Research Report of Faculty of Technology, Chiba University, 9(15):1-55.

Matsuo M, Yokoyama M, Umemura K, Sugiyama J, Kawai S, Gril J, Kubodera S, Mitsutani T, Ozaki H, Sakamoto M, Imamura M (2011) Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment, *Holzforschung* 65(3):361-8.

Penagos C, Girardclos O, Hunot J-Y, Martin C, Jacquot K, Cao I, Lemoine M, Brossier B, Lavier C, Coubray S, Dufraisse A (2024) Naming, relocating and dating the woods of Notre-Dame “forest”, first results based on collated data and archaeological surveys of the remains, *Journal of Cultural Heritage*, 65:21–31.

Yokoyama M, Gril J, Matsuo M, Yano H, Sugiyama J, Clair B, Kubodera S, Mitsutani T, Sakamoto M, Ozaki H, Imamura M, Kawai S (2009) Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *Comptes Rendus Physique*, 10(7):601-611.

## Impact of natural ageing of five Guyanese wood residues on their extractive's chemical composition and anti-termite activity

KIENY Emma<sup>1\*</sup>, CANDELIER Kévin<sup>2,3\*</sup>, ESTEVEZ Yannick<sup>4</sup>, DUMARCAY Stéphane<sup>5</sup>, GERARDIN Philippe<sup>5</sup>, DAMAY Jérémie<sup>2,3</sup>, LEHNEBACH Romain<sup>1</sup> THEVENON Marie-France<sup>2,3</sup>, BOSSU Julie<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, Ecologie de Forêts de Guyane (EcoFoG), AgroparisTech, CNRS, INRAE, Univ Antilles, Univ Guyane, Kourou, Guyane Française, France.

<sup>2</sup>CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

<sup>3</sup>BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

<sup>4</sup>CNRS, Ecologie de Forêts de Guyane (EcoFoG), AgroparisTech, CIRAD, INRAE, Univ Antilles, Univ Guyane, Kourou, Guyane Française, France.

<sup>5</sup>Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois, Nancy (France).

[emma.kieny@cirad.fr](mailto:emma.kieny@cirad.fr), [kevin.candelier@cirad.fr](mailto:kevin.candelier@cirad.fr)

**Keywords:** Anti-termite activity, Chemical composition, Extractives, French Guiana, Natural ageing, Woody residues.

### Context and objective

The valorization of Amazonian wood residues into active chemical compounds could be an eco-friendly, cost effective and valuable way to develop wood preservatives formulations (Isman and Machial 2006). The supply chain and storage of wood residues can be complex, especially in tropical areas, and can therefore lead to degradation or changes in the chemical composition, chemical structure and thus properties of ligneous biomass (De Freitas Homem De Faria et al 2021).

The present research aims to assess the impact of 4-years natural ageing in indoor conditions ( $20 \pm 2$  °C and  $65 \pm 5$  % RH) of 5 Guyanese's wood by-products [Angelique (*Dicorynia guianensis*, Fabaceae), Wapa (*Eperua spp.*, Fabaceae), Wacapou (*Vouacapoua americana*, Fabaceae), Grigon franc (*Sextonia rubra*, Lauraceae), Gonfolo (*Qualea spp.*, Vochysiaceae)], on their extractive content, chemical composition and anti-termite activity). The five wood species were selected according to their ability (based on their extractive yield and natural durability) to provide a large quantity of industrial by-products with a high number of extractive compounds and potential bioactivity properties (Fig. 1).

### Materials and methods

For each wood species, heartwood residues were collected in 2018 and 2022, at the Kourou's sawmill (Kourou, French Guiana), and then extracted by maceration process using ethyl acetate, in 2022 (Kieny et al 2024). Yields of each extractives fraction were determined and their chemical composition were analyzed by FT-IR, GC-MS (Bopenga Bopenga et al 2019) and LC-MS (Heim et al 2022). In line, the anti-termite activity of all extractive's fractions was evaluated against European subterranean termite species (*Reticulitermes flavipes*) by laboratory screening tests. The termite screening tests consisted to impregnate cellulosic papers with the extractive's solutions (with different concentrations), and to expose them against 20 termite workers. After 17 days, the termite survival rate (TSR%) was determined and the relative



degraded area of each paper (Sterm. %) was evaluated by image analysis method (Boer et al 2024).

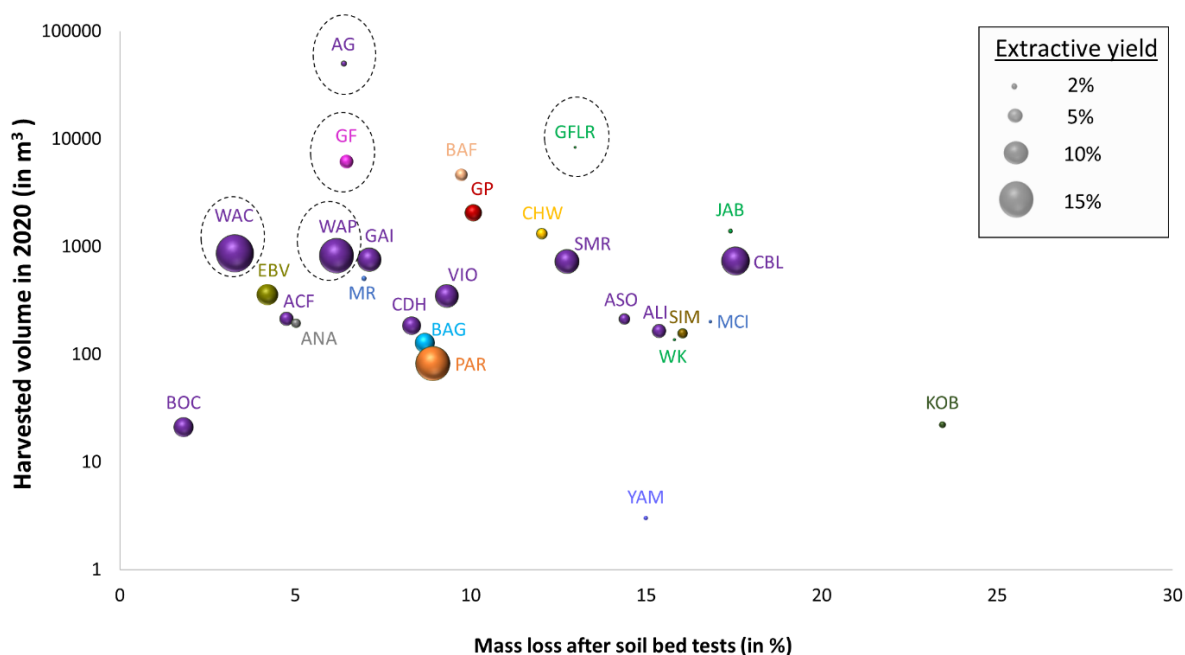


Fig. 1: Repartition of major Guyanese wood species according to their decay resistance to 6-months soil bed test, extractive yield (using ethyl alcohol/benzene) and annual harvested volume in 2020. The species surrounded by a dotted circle correspond to the selected wood for this study: AG is Angelique, GF is Grignon, WAC is Wacapou, WAP is Wapa and GFLR is Gonfolo. Data for harvested volumes are provided by ONF (ONF 2022). Data concerning the wood mass loss after soil bed tested come from the database of wood properties from specimens of the French Guiana wood collection (Beauchêne et al 2021). Data from wood extractive yields come from the Chemical CIRAD database (Gérard et al 2019).

## Preliminary results

Natural ageing of wood residues undergoes a loss of their extractive compounds, for all wood species except for Wapa (Fig.2). Indeed, the extractive loss, after 4 years of indoor natural ageing, were 56.3%, 43.9%, 29.5 %, 9.9 % and -10.8 % for Angelique, Wacapou, Grignon, Gonfolo and Wapa, respectively.

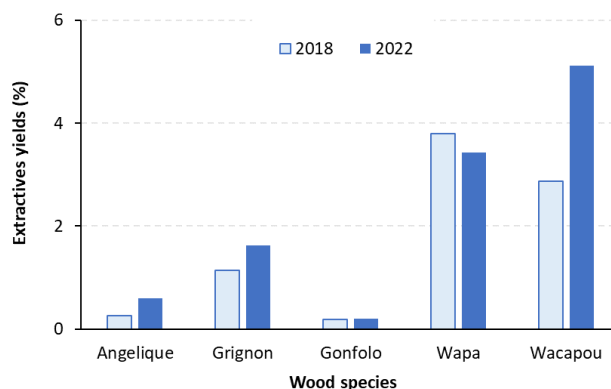


Fig. 2: Extractives yields from the 5 wood by-products maceration processes using ethyl acetate, according to the year of wood by-products harvesting.

For all wood species, GC-MS and LC-MS confirmed that the natural ageing of wood undergoes a modification in the composition of their respective extractive fraction, mainly due to the volatilization or oxidation reactions occurred on some chemical compounds.

This results in a very significant impact on the anti-termite activity level of extractives, with the extractives from 2022 samples which are significantly more effective than those of extractives from 2018 samples (Fig. 3).

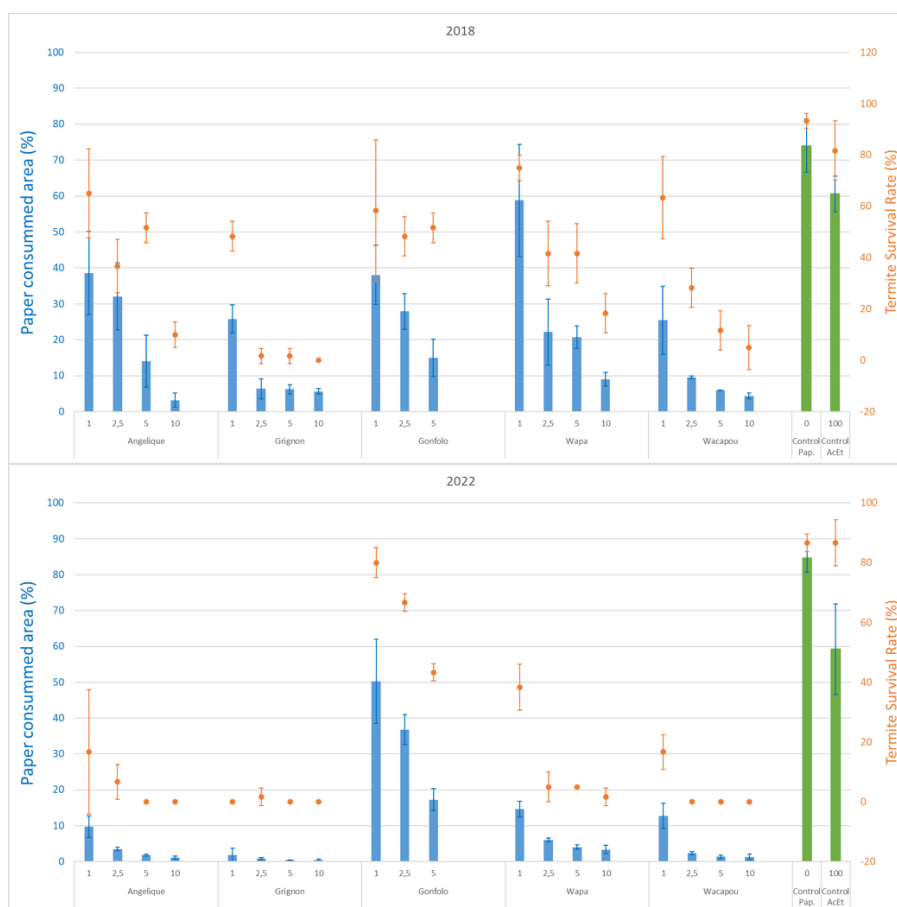


Fig. 3: Average values of the percentage of paper loss area (histogram) and termite survival rates (line), according to the concentration of the different wood extractives (from ethyl acetate maceration) solution, and the year of wood by-products harvesting.

This anti-termite activity of wood extractives was mainly due to the presence of major active chemical compounds such as cassane-type diterpenoids for Wacapou (Kieny et al 2024); catechin and epicatechin for Angelique (Anouhe et al. 2018); eperuic acid, catechin, epicatechin, rhamnopyranosyl and dihydrokaempferol for Wapa (Royer et al 2010); and Rubrynlide and rubrenolide for Grignon franc (Houël et al 2017) (Fig. 4).

### Conclusion and perspectives

The extractive fraction (obtained by ethyl acetate maceration) from Guyanese wood, except from Gonfolo, possess a high anti-termite activity against *Reticulitermes flavipes*. This antitermite activities was reduced by the natural ageing process of the raw wood residue before extraction step. These preliminary results highlight the importance of harvesting, storage and conditioning of wood by-products to optimize the quality of chemical compounds to be extracted and valorized.

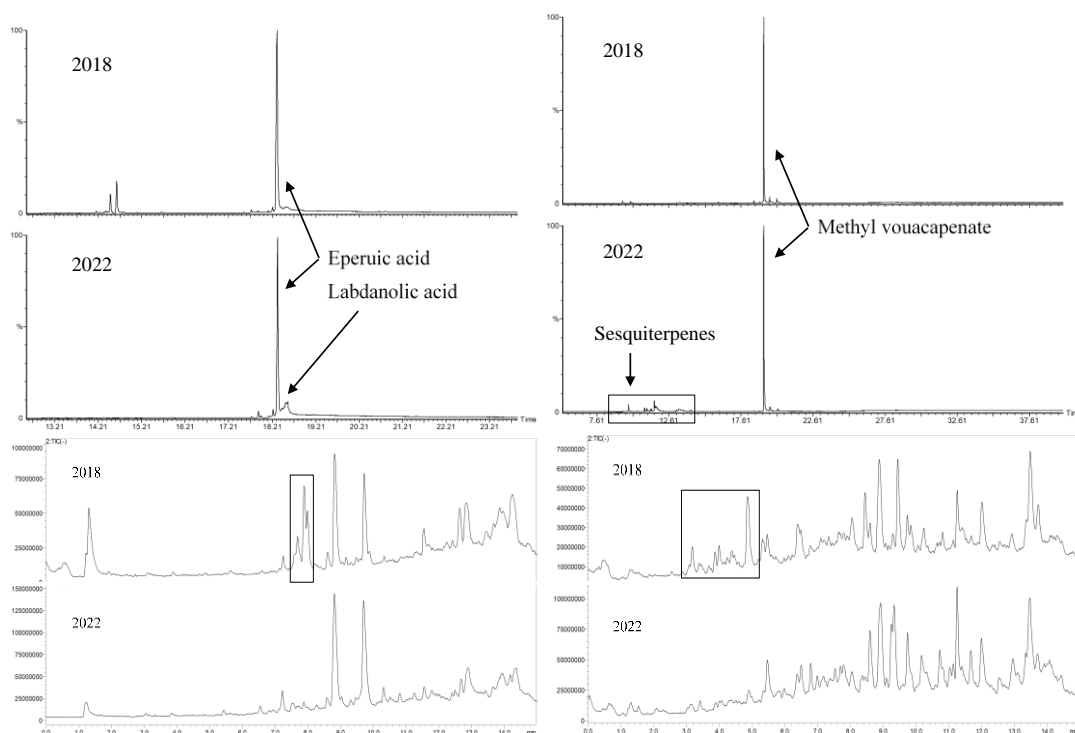


Fig. 4; chromatograms: (a) GC-MS chromatograms of Wapa extracts. (b) GC-MS chromatograms of Wacapou extracts. The major compound was methyl vouacapenate. Sesquiterpenes detected between 8.0 and 13.0 min in 2022 sample were not present in 2018 sample. (c) LC-MS (ESI-) chromatograms of Grignon extracts. The major compounds at 8.8 and 9.8 min exhibited masses corresponding to rubrynlolide and rubrenolide respectively when important peaks observed around 8.0 min in 2018 sample seemed to correspond to oxidated forms of these 2 compounds with molecular masses increased by 16 Da. (d) LC-MS (ESI-) chromatograms of Gonfolo extracts. Chromatographic profiles comparison showed the appearance of peaks between 3.0 and 5.0 min for 2018 sample which could be due to highly oxygenated compounds.

## Acknowledgments

This work was conducted in the framework of the PhD thesis of Emma Kieny, which is financially supported by Ademe (Environmental and Energy Management Agency) and CIRAD. These researches take part from the project PROTEXTWOOD (ID 2202-102) funded through LabEx AGRO ANR-10-LABX-0001-01 (under I-Site Université de Montpellier framework) and the project PANTHER2-Guyane funded through Agence Nationale de la Recherche (ANR-22-CE43-0019). In addition, this work has benefited from an "Investissement d'Avenir" grant managed by Agence Nationale de la Recherche (CEBA, ref. ANR-10-LABX-25-01), and it was also supported by the FEADER (European Regional Development Fund) research project "EcovaloBois" (Project number: GY0015430), and by the CNRS peps INSIS 2018 research project "GuyavaloFibres".

## References

Anouhe JBS, Niamké FB, Faustin M, Virieux D, Pirat JL, Adima AA, Kati-Coulibaly S, Amusant N (2018) *The role of extractives in the natural durability of the heartwood of *Dicorynia guianensis* Amsh: new insights in antioxydant and antifungal properties*. *Annals of Forest Science*, 75: 15.

Beauchêne J, Thibaut B, Amusant N, Cigna J (2021) Database of wood properties from specimens of the French Guiana wood collection. <https://doi.org/10.18167/DVN1/R4G7BC>, CIRAD Dataverse, V2, UNF:6:8JcN3T9n1TCMtIvIvAx2Lg== [fileUNF]

- Boer FD, Pignolet L, Valette J, Candelier K, Commandré JM, Fournier M, Thévenon MF (2024) Efficacy of slow pyrolysis liquid from sugarcane bagasse for wood protection and its leaching properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 19 pages. Online version.
- Bopenga Bopenga CSA, Degboevi HM, Candelier K, Engonga PE, Dumarçay S, Thévenon MF, Gérardin Charbonnier C, Philippe Gérardin P (2019) Characterization of Extracts from the Bark of the Gabon Hazel Tree (*Coula edulis* baill) for Antioxidant, Antifungal and Anti-termite Products. *Journal of Renewable Materials*, 9(1) : 17-33.
- De Freitas Homem De Faria B, Lanvin C, Valette J, P. Rousset, De Cassia Oliveira Carneiro A, Caldeira-Pires A, Candelier K (2021) Effect of Leaching and Fungal Attacks During Storage on Chemical Properties of Raw and Torrefied Biomasses, *Waste and Biomass Valorisation*, 12: 1447–1463.
- Gerard J, Paradis S, Thibaut B (2019) CIRAD wood chemical composition database, <https://doi.org/10.18167/DVN1/U1FTIU>. CIRAD Dataverse, V2, UNF:6:czMLNz7DhGsC0v65pwqI8Q== [fileUNF]
- Heim L, Dodeler R, Brancheriau L, Marchal R, Boutahar N, Lotte S, Dumarçay S, Gérardin P, Candelier K (2022) Comparison of the extractives chemical signatures among branch, knot and bark wood fractions from forestry and agroforestry Walnut (*Juglans regia* × *J. nigra*), by NIR-Spectroscopy and LC-MS analyses. *iForest*, 15: 56-62.
- Houël E, Rodrigues AMS, Nicolini EA, Ngwete O, Duplais C, Stien D, Amusant N (2017) Natural durability of *Sextonia rubra*, an Amazonian tree species: description and origin. IRG, 15 p. IRG Annual Meeting. 48, 2017-06-04/2017-06-08, Ghent, Belgium.
- Isman MB, Machial CM (2006) Pesticides based on plant essential oils: from traditional practice to commercialization. In: *Advances in Phytomedicine* (Vol. 3). Eds. Rai, M., Carpinella, M.C., Elsevier BV, Amsterdam. pp. 29–44 (Chapter 2).
- Kieny E, Candelier K, Milhe L, Estevez Y, Sophie C, Lehnebach R, Damay J, Florez D, Houël E, Thévenon MF, Bossu J (2024) The potential of Wacapou (*Vouacapoua americana*) extracts to develop new biobased protective solutions for low durability wood species. *Journal of Renewable Material*. In press.
- ONF (2022) Activities annual report [In French], Territorial Direction of French Guiana, 74 pages.
- Royer M, Stien D, Beauchêne J, Herbet G, McLean JP, Thibaut A, Thibaut B (2010) Extractives of the tropical wood wallaba (*Eperua falcata* Aubl.) as natural anti-swelling agents. *Holzforschung*, 64: 211–215.

## Impact de la saignée sur le comportement mécanique des troncs de deux clones d'hévéa

ENGONGA EDZANG Arnauld<sup>1,2</sup>, GRIL Joseph<sup>1,2</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>2,3</sup>,  
BADEL Eric<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup>Clermont Auvergne Université, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup>CENAREST, IRT, Libreville, Gabon

[arnauld.engonga-edzang@inrae.fr](mailto:arnauld.engonga-edzang@inrae.fr)

**Mots clefs :** *Hevea brasiliensis* ; croissance ; saignée ; rigidité de flexion ; rupture ; vent

### Contexte et objectifs

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*) ou arbre à caoutchouc est la principale source de production de latex naturel répondant à la plupart des besoins mondiaux en caoutchouc. L'hévéaculture représente à ce jour près de 15 millions d'hectares de plantation à travers le monde, pour une production de plus 14 millions de tonnes. Pour récolter le latex, on utilise la méthode dite de la « saignée » qui consiste à sectionner les cellules laticifères situées en-dessous de l'écorce afin de laisser couler le latex. Cette production est fortement impactée par la sensibilité de certains clones à la casse au vent (Nicolas 1990) qui entraîne la réduction du nombre d'arbres exploitables dans les plantations. On estime à près de 40% les pertes dues à la casse au vent des arbres sur une période de 30 ans correspondant à la durée d'exploitation d'une plantation (Clément-Demange et al 1995). Ces pertes tendent à être accentuées par la mise en saignée des arbres. En effet, ce protocole génère un puits de carbone additionnel pour l'arbre et a pour conséquence la réduction de la croissance de ce dernier (Gohet 1996, Silpi et al 2006). On explique souvent les différences de sensibilité à la casse au vent des clones d'hévéa par la compétition entre la production de latex et la croissance (Silpi et al 2006). En d'autres termes, les métabolismes de l'arbre destinés à la croissance sont détournés afin de compenser la production intense et répétée de latex induite par la saignée. Il s'en suit une très forte réduction de la croissance radiale de l'arbre comparativement à la croissance en hauteur qui est moins affectée (Fourcaud et al 1998). Ainsi, les réponses de croissance se traduisent par une modification du rapport entre croissance radiale et croissance en hauteur, impactant le comportement mécanique de la tige (Petty et Swain 1985). Il faut de plus ajouter que le critère de mise en exploitation qui est basé sur une circonférence des arbres de 50 cm à 1 mètre du sol, peut constituer un facteur de vulnérabilité face au risque de casse pour certains clones. Cette norme ne tient pas compte de la vitesse de croissance propre à chaque clone, certain pouvant atteindre cette circonférence tout en produisant du bois avec de faibles propriétés mécaniques (Engonga et al 2024). Cette inadéquation entre le critère de mise en saignée et les caractéristiques mécaniques de l'arbre peut ainsi accroître la sensibilité de certains clones à la casse au vent. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse aux conséquences de la saignée sur le comportement mécanique des arbres et le bénéfice en termes de sensibilité à la casse que pourrait avoir de retarder celle-ci. Pour ce faire, nous avons mis en place une expérimentation dite de « retard de la saignée ou retard d'exploitation ». Ce dispositif a été couplé à des essais mécaniques de flexion sur pied pour évaluer la rigidité de flexion (EI) et le module d'élasticité (MOE) des arbres au terme de la période de retard.

## Matériel et méthode

Les expérimentations ont été menées dans des plantations d'hévéas de la SOGB (Société des Caoutchoucs de Grand-Béréby) au Sud-Ouest de la Cote d'Ivoire ( $4^{\circ}40'41.4''N$ ,  $7^{\circ}5'28.7''O$ ) et celle de la SAPH (Société Africaine de Plantations d'Hévéas) au Sud-Est de la Cote d'Ivoire ( $5^{\circ}30'7.3''N$ ,  $3^{\circ}30'40.1''O$ ). Ces essais ont été réalisés sur deux clones réputés sensibles à la casse au vent : le clone IRCA825 et le clone PB314. Le dispositif complet de cet essai est constitué de 20 paires d'arbres de chaque clone, soit 2 traitements : 20 arbres saignés (S) et 20 arbres témoins non saignés (NS). Ces paires jumelles ont été sélectionnées côte-à-côte et sur la même ligne (Fig. 1) avec  $50 \pm 3$  cm de circonférence à 1 m du sol comme critère d'appariement. Après la mise en place de l'essai en mars 2021, un suivi de croissance des arbres (2 fois/an) a été effectué jusqu'à la fin de la période de retard en mars 2024.

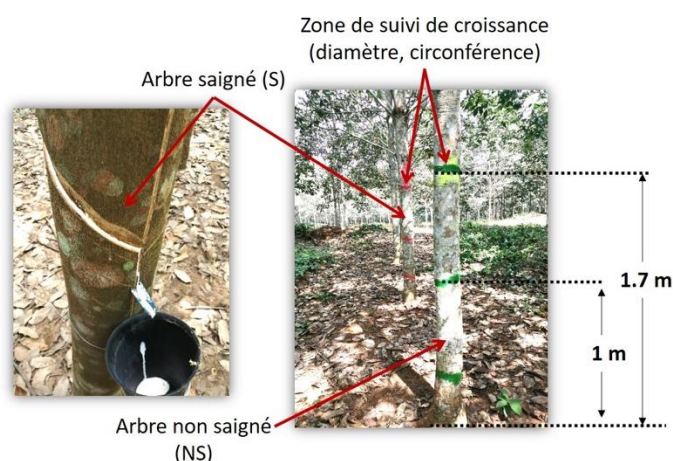


Fig. 1 : Dispositif expérimental de l'essai de retard de la saignée. Deux modalités de traitement : des arbres saignés appariés avec des arbres témoins non saignés.

Des essais de flexion sur pied ont été effectués après 3 ans de suivi de croissance, pour caractériser la rigidité de flexion  $EI$  des troncs issus des deux traitements (S et NS), leur module d'élasticité MOE et leur contrainte de rupture  $\sigma_r$ . Ils ont été réalisés à l'aide d'un ensemble d'équipements constitués d'un câble synthétique placé dans le houppier (à environ 7 m) de l'arbre à tester, d'un dynamomètre enregistrant la force et d'un tire-câble ancré au pied d'un autre arbre et permettant de tendre le câble (Fig. 2). Les déformations induites par la flexion de la tige sont mesurées à l'aide de capteurs de déformation (élastomètre) placés sur le tronc et issus du système de mesure PICUS TreeQinetic (Engonga et al 2022). Pour l'analyse des données de ces essais nous sommes appuyés sur la méthode d'analyse décrite par Engonga et al (2022).

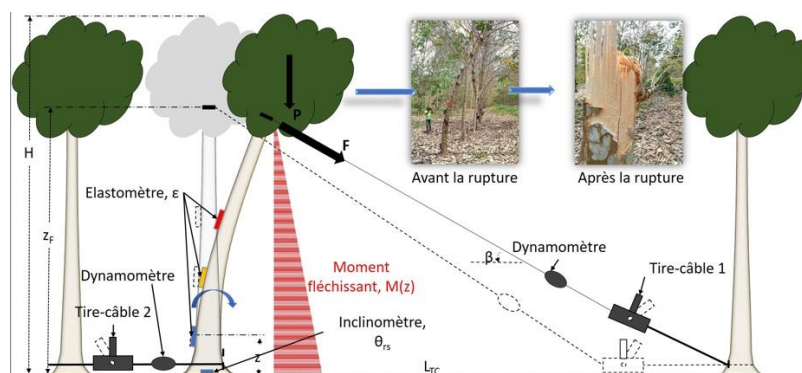


Fig. 2 : Schéma du test de rupture indiquant la disposition des capteurs. Ici, les élastomètres sont placés du côté tendu de la tige en flexion. L'inclinomètre à la base de la tige mesure la rotation ( $\theta_{rs}$ ) du système racine-sol. Un second tire-câble est placé à la base de l'arbre pour limiter cette rotation.

## Résultats et discussion

Le suivi de croissance nous a permis d'observer l'impact de la saignée sur la croissance secondaire. Les Fig. 3 et Fig. 4 présentent l'évolution de la croissance secondaire des arbres chez les clones IRCA825 et PB314. Chez le clone IRCA825 (Fig. 3), on observe une différence de croissance +51% entre les arbres NS (soit une croissance de  $4,8 \pm 1,7$  cm en diamètre) et S (soit une croissance de  $3,2 \pm 1,1$  cm en diamètre) après 3 ans de traitement. Cette différence de croissance entre les deux traitements montre bien que la saignée réduit la croissance secondaire des arbres. Des observations similaires ont été faites chez le clone PB314 (Fig. 4), avec une différence de croissance +104% entre les arbres NS (soit une croissance de  $2,6 \pm 1,2$  cm en diamètre) et S (soit une croissance de  $1,3 \pm 1,1$  cm en diamètre) sur la même période.

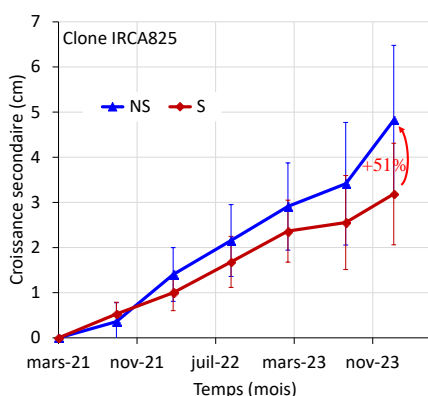


Fig. 3 : Croissance secondaire moyenne du clone IRCA825 après 3 ans de traitement (mesure du diamètre à 1,7 m)

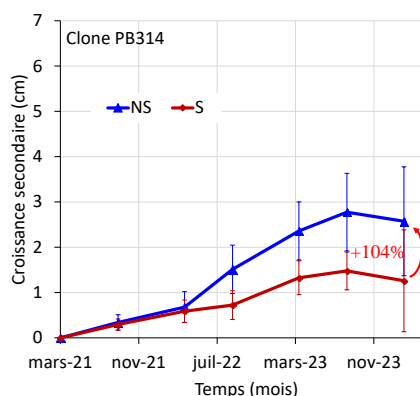


Fig. 4 : Croissance secondaire moyenne du clone PB314 après 3 ans de traitement (mesure du diamètre à 1,7 m)

Les différences de croissance secondaire observées se traduisent par une plus forte rigidité de flexion (EI) des arbres NS comparativement aux arbres S. Les graphiques de la Fig. 5 montrent des différences de EI entre les arbres NS et S de l'ordre de 87% chez le clone IRCA825 et de 34% chez le clone PB314.

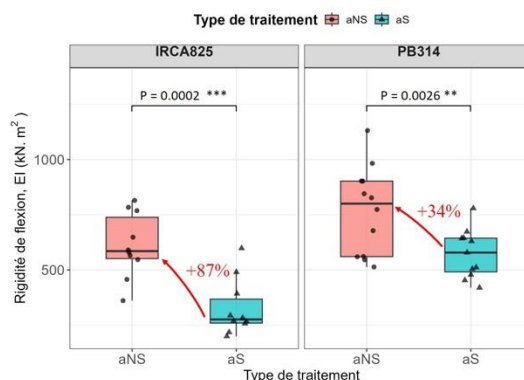


Fig. 5 : Comparaison de la rigidité de flexion mesurée à 1,7 m sur des arbres issus des traitements NS et S, chez les clones IRCA825 (à gauche) et PB314 (à droite). (\*) différence significative.

L'analyse des effets de la saignée sur les propriétés mécaniques du bois vert révèle des différences relativement similaires entre les deux clones étudiés en ce qui concerne MOE. En effet, la comparaison du MOE (Fig. 6) entre les arbres NS et S montre des écarts de l'ordre de 17% chez le clone IRCA825 et de 15% chez le clone PB314. Il est toutefois important de noter que, pour les deux clones, la contrainte à la rupture (Fig. 7) ne présente aucune différence significative entre les arbres issus des deux traitements (NS et S). Ces variations, bien que

modestes, suggèrent une influence potentielle de la saignée sur les propriétés élastiques du bois de ces clones sans nécessairement affecter la résistance à la rupture.

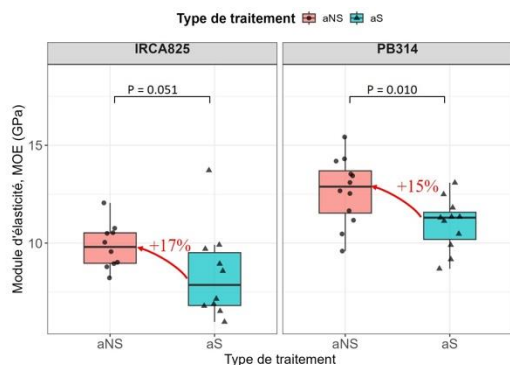


Fig. 6 : Comparaison du module d'élasticité mesurée à 1,7 m sur des arbres issus des traitements NS et S, chez les clones IRCA825 (à gauche) et PB314 (à droite).

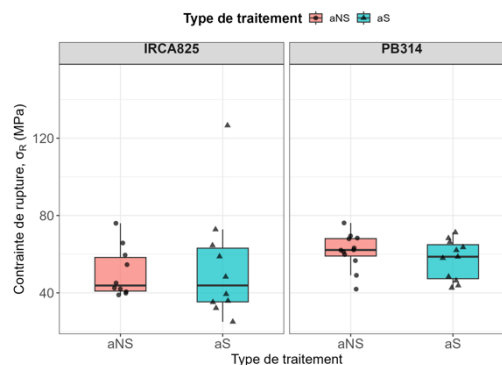


Fig. 7 : Comparaison de la contrainte à la rupture mesurée sur des arbres issus des traitements NS et S, chez les clones IRCA825 (à gauche) et PB314 (à droite).

## Conclusion

Cette étude a permis de confirmer que la saignée agit comme un puits de carbone, entraînant une réduction significative de la croissance secondaire chez les clones IRCA825 et PB314. Cette diminution de la croissance se manifeste au niveau mécanique par une rigidité de flexion réduite. La saignée affecte aussi les propriétés élastiques du bois vert, notamment le module d'élasticité mais aucun effet a été relevé sur la contrainte à la rupture. En conclusion, les résultats présentés suggèrent qu'un report de la mise en saignée pourrait améliorer de manière substantielle la rigidité de flexion des arbres de ces deux clones et leur sensibilité à la casse au vent, contribuant ainsi à une meilleure stabilité et longévité des plantations.

## Remerciements

Ces travaux font partir du projet « Vent debout » financé par l'IFC (Institut Français du Caoutchouc) et les sociétés membres Michelin, SIPH et Socfin. Nous remercions particulièrement les directions des plantations SOGB et SAPH-Bongo en Côte d'Ivoire pour l'appui logistique sur les plantations. Nous remercions également le projet ANR PRCE DIAMWOOD et le PEPS CNRS FutureVieuxBois pour l'aide à la mobilité accordée pour la participation aux journées du GDR Bois.

## Références

Clément-Demange A, Nicolas D, Legnaté H, Rivano F, Le Guen V, Gnagne M.Y, Chapuset T, (1995) Hévéa: stratégies de sélection. Plantations, recherche, développement 2, 5– 19.

Engonga Edzang A.C, Niez B, Heim L, Fourcaud T, Gril J, Moulia B, Badel E (2022) Wind safety of rubber trees in plantation: methodological analysis of bending experiments on inclined standing trees. Bois & Forêts des Tropiques 354, 65–77. <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36912>.

Edzang AE, Pitti RM, Kouassi D, et al (2024) Interclonal variability in sensitivity to wind breakage: Comparative analysis of the mechanical behaviour of stems of two Hevea clones. For Ecol Manage 562:. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121934>



Fourcaud T, Clément-Demange A, Costes E, Gnagne M (1998) Description of a simulation approach to investigate wind damage in rubber trees (*Hevea brasiliensis*), in: IUFRO Conference on Wind and Other Abiotic Risks to Forests.

Gohet E, Prévôt J-C, Eschbach J-M, Clément A, Jacob J-L (1996) Clone, croissance et stimulation, facteurs de la production de latex. Plantations, Recherche, Développement.

Nicolas D (1990) L'hévéa: sa sélection: les effets destructifs du vent sur cet arbre, in: Architecture, Structure, Mécanique de l'arbre. Université de Montpellier 2, pp. 69–79.

Petty J, Swain C (1985) Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 58, 75–84.

Silpi U, Thaler P, Kasemsap P, Lacoïnte A, Chantuma A, Adam B, Gohet E, Thaniswanyankura S, Améglio T (2006) Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiology* 26, 1579–1587.  
<https://doi.org/10.1093/treephys/26.12.1579>.

## Résumés – Session B

## **Towards decision support system using heterogeneous knowledge and data for assessing new insulating panels from Guyana material**

HAMZAH Hajjar<sup>1,2</sup>, MICHAUD Franck<sup>1</sup>, BAUDRIT Cédric<sup>1</sup>, FERNANDEZ Christophe<sup>2</sup>,  
MOREAU Jérôme<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Innovation Matériau Bois Habitat Apprentissage (LIMBHA), Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France

<sup>2</sup>INRAE, USC 1368, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, F-33405 Talence, France  
hamzah.hajjar@esb-campus.fr

**Keywords:** Decision Support System, Heterogeneous Knowledge Integration, Sustainable Insulation wood Panels, French Guiana, Machine Learning, Expert Knowledge.

### **Context and objective**

This research aims to develop an integrated decision support system using heterogeneous knowledge and data to assess the performance of innovative insulating panels made from residual biomass in French Guiana, considering economic, technical, and environmental aspects. This work is part of the PANTHER<sup>2</sup>Guyane project, which has the goal of creating the use of local biomass residues in producing sustainable and eco-friendly thermal insulation materials, addressing regional challenges such as rapid demographic growth and climate change. The primary challenge in evaluating the performance of these panels lies in understanding and modelling the complex interactions between various components of the manufacturing process across multiple scales in an uncertain environment (e.g., climate change, evolving manufacturing standards, and physicochemical knowledge gaps). Traditional quality control methods, which rely heavily on historical data, often fail to capture the complexities of the process, leading to less accurate predictive models (Zhou et al 2016). This research addresses these limitations by integrating heterogeneous data and expert knowledge. The methodology involves gathering and structuring knowledge from multiple sources, such as scientific literature, internal data, and expert interviews, using concept maps and process maps to create a unified framework (Baudrit et al 2024). This structured knowledge is then used to develop a mathematical model, which is trained and iteratively improved using machine learning algorithms (Bertolini et al 2021). The mathematical model serves as the foundation for decision-making, evaluating the impact of various factors on the insulation panel's performance and predicting future outcomes. The expected outcome is the development of an effective decision support system that helps stakeholders make informed decisions regarding the performance of new created wood panels. This system has the potential to be applied across different industrial sectors, contributing to both economic and environmental sustainability goals.

### **Methodology**

This study follows a systematic and iterative approach to develop a decision support system for assessing the performance of innovative insulating panels made from residual biomass. The methodology is divided into three primary steps: Model Development through Heterogeneous Knowledge, Training the Machine Learning Model, and Performance and Decision Support Evaluation (Fig. 1).

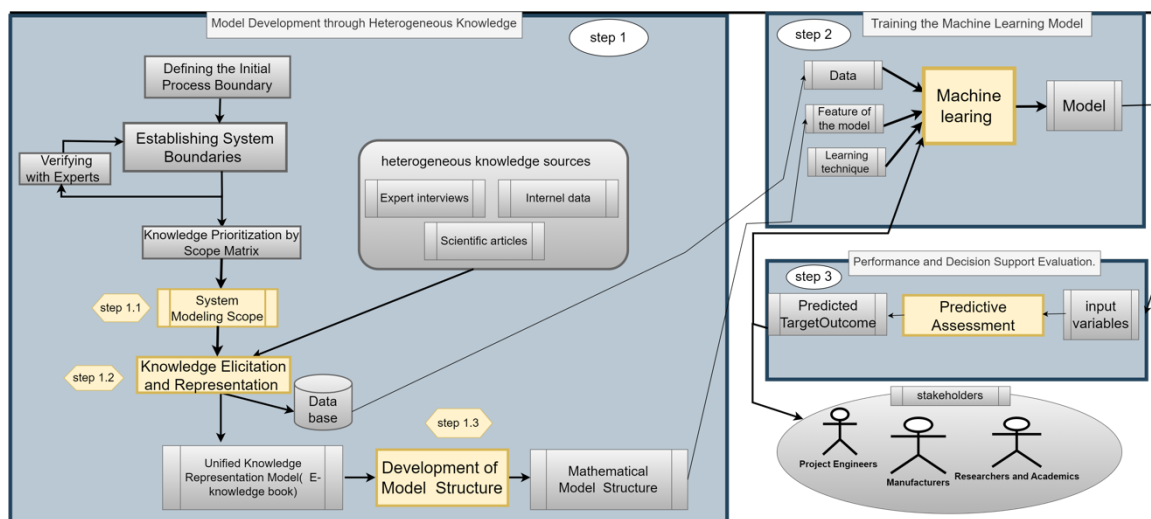


Fig. 1: Overview of the Integrated Methodology for Developing a Decision Support System for Biomass-Based Insulating Panels

### *Step 1. Model Development through Heterogeneous Knowledge*

#### Step 1.1: System Modeling Scope

The System Modelling Scope is the first sub step to reach. It defines the critical areas of the manufacturing system to be modelled. The first stage of building the scope involves defining the initial global process boundary of the manufacturing system through detailed discussions with the project chief, who has an overarching view of the workflow. This boundary outlines key operational processes and is iteratively refined through unstructured domain-specific expert interviews (Bryman 2001). This iterative validation ensures that the system boundary aligns with real-world operations. Simultaneously an electronic survey was conducted with experts, and their input was integrated using a Scope Matrix (Milton 2007), which is built and employed to prioritize knowledge areas based on their importance and ease of acquisition, helping the project team focus on the most relevant elements for model development. By completing these stages, the System Modelling Scope is finalized as a sharable framework draw, concentrating efforts on the parts of the system most critical for data gathering and modelling.

#### Step 1.2: Knowledge Elicitation and Representation

The primary objective of this step is to gather and represent both tacit (implicit, experience-based insights) and explicit (clearly defined and documented) knowledge from multiple sources, including scientific articles, internal data, and expert interviews, which are aligned with the processes defined within the System Modelling Scope. By systematically organizing and representing this knowledge, we ensure the development of a Unified Knowledge Representation Model (E-knowledge book), which serves as a formal framework that organizes and defines relationships between the various concepts within the system (Baudrit et al 2024). This structured knowledge and available relevant data are stored in a database, ensuring efficient access, processing, and integration for future mathematical model development. The knowledge gathering process is followed by organizing the collected data into structured formats, such as:

- Process Maps: Defining workflows and variables within the system.
- Concept Maps: Offering a hierarchical view of relationships between concepts.

### Step 1.3: Development of Model Structure

The main objective of this step is to construct an initial mathematical model structure by defining key input, control, and output variables. This structure, based on the knowledge organized in the Unified Knowledge Representation Model (E-knowledge book), serves as the foundation for model training and optimization in Step 2 using machine learning techniques.

#### Steps 2 and 3: Machine learning Training and Decision Support Evaluation

In Step 2, the model is trained using selected input features and target variables based on the structure from Step 1.3. Machine learning techniques are applied to reveal relationships, and iterative refinements improve predictive accuracy. In Step 3, the model performs Predictive Assessment, generating outcomes that help stakeholders assess system performance. Continuous updates with new data further enhance the model's accuracy and reliability.

#### Decision Support System Overview

The Decision Support System (DSS) in this framework will assist stakeholders like project engineers, manufacturers, and decision-makers in evaluating the performance of biomass-based insulating panels. It will integrate predictive assessment models (step 3), experts knowledge and internal data into a unified system (software). Models, trained via machine learning, provides predictive assessments and actionable insights. The system is continuously refined with new data and feedback to remain adaptive. However, its reliability depends on data quality and expert input, which may limit its accuracy.

## Results and Discussion

This section summarizes the results of Step 1: Model Development through Heterogeneous Knowledge, focusing on defining system boundaries, organizing knowledge, and building a mathematical model structure that supports machine learning processes

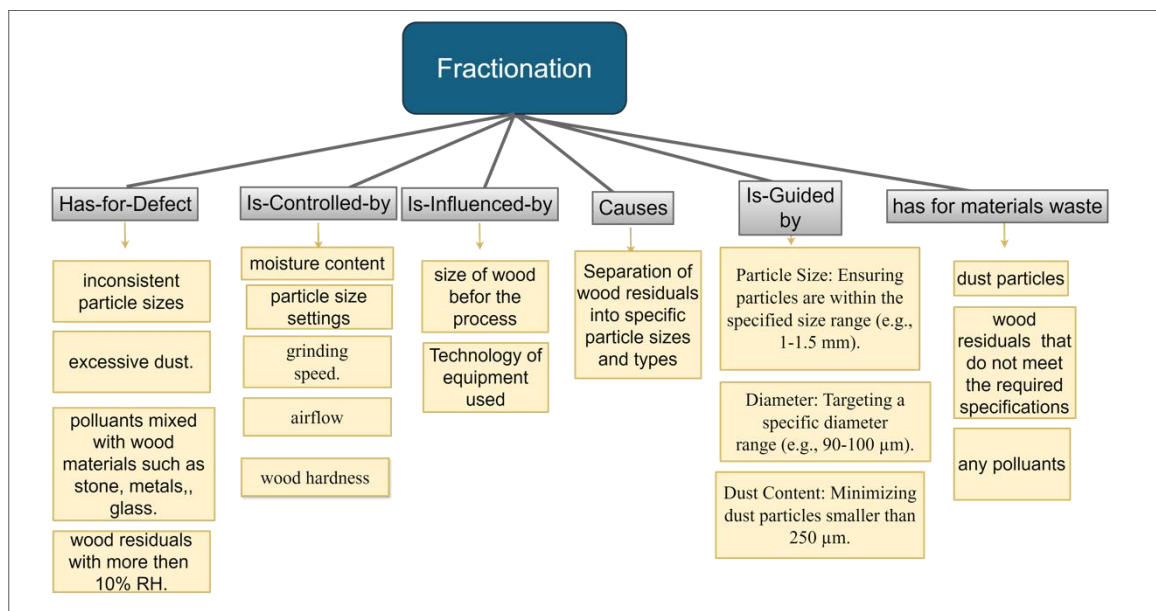


Fig. 2: A Section of the Concept Map for the Fractionation Process in Wood Manufacturing

First work started by defining the system boundary through two interviews with the project chief and two with a key expert. This boundary was refined iteratively through unstructured interviews with domain-specific experts, and additional feedback was gathered via email. Following this, a Scope Matrix was employed to prioritize the most critical knowledge areas,

based on a survey with 40% of Panther project expert participation. Processes like fractionation and thermal property studies were highlighted as key for modeling and data collection. To capture both tacit and explicit knowledge, structured and semi-structured interviews were conducted, each lasting around an hour per process. Concept Maps were developed to clarify relationships within the system (Fig. 2), and Process Maps were used to define the key input, control, and output variables, forming the foundation of the mathematical model structure. (Fig. 3)

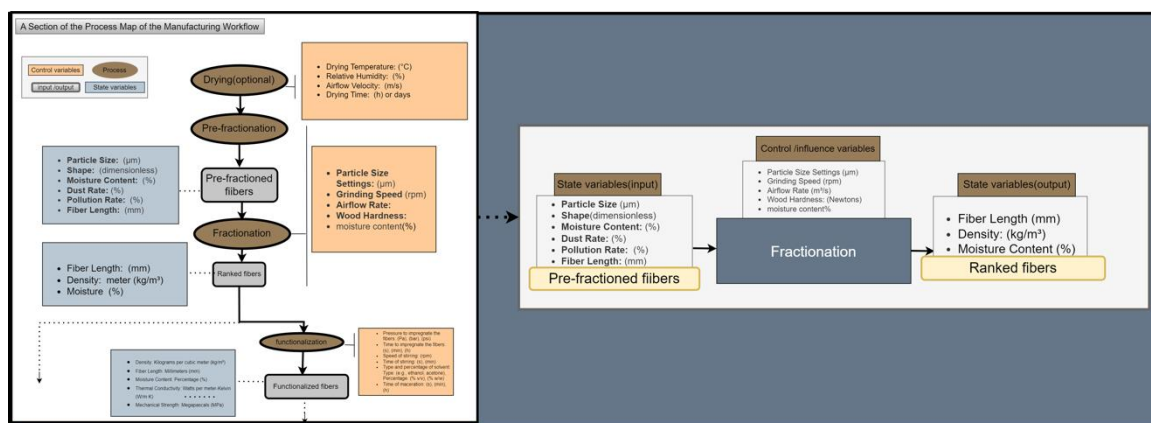


Fig. 3: Developed Fractionation Architecture Model Based on the Output of the Unified Knowledge Representation Model: Process Map

## Conclusion and perspective

This preliminary work successfully established the foundational framework for a decision support system to evaluate innovative insulating panels made from residual biomass. By systematically gathering and organizing heterogeneous knowledge, we developed a comprehensive System Modelling Scope and a Unified Knowledge Representation Model, which serve as the basis for the initial mathematical model structure. Moving forward, the focus will be on refining this model through machine learning techniques and predictive assessment. This approach has the potential for broader application across various industries, supporting both sustainable practices and informed decision-making

## References

- Baudrit C, Fernandez C, Couteaux J, Ndiaye A (2024) Electronic knowledge books (eK-Books) as a medium to capitalise on and transfer scientific, engineering, operational, technological and craft knowledge. PLoS ONE 19(5): e0299150.
- Zhou L, Li W, Wang H (2016) A comprehensive review of energy consumption models in the manufacturing industry. Journal of Cleaner Production, 112, 2792-2808.
- Bertolini M, Mezzogori D, Neroni M, Zammori F (2021) Machine Learning for industrial applications: A comprehensive literature review. Expert Systems with Applications, 175, 114820.
- Bryman A (2001) Social research methods. Oxford University Press.
- Milton N (2007) Knowledge acquisition in practice: A step-by-step guide. Springer.

## La plateforme SILVATECH, infrastructure scientifique collective

RUELLE Julien, ANGELI Nicolas, ROSE Christophe, GERARD Bastien

Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva

[julien.ruelle@inrae.fr](mailto:julien.ruelle@inrae.fr)

**Mots clés :** Isotopie ; Chimie ; Microscopie ; Tomographie ; Micro-densitométrie ; Diffraction RX ; Histologie, Forêt-Bois

### Présentation de SILVATECH

La plateforme SILVATECH est une plateforme nationale dédiée à l'**analyse des écosystèmes forestiers et du bois**. La gamme de techniques et méthodes développées permet des approches intégrées des **échelles moléculaires à la parcelle**, et une capacité de décryptage des **structures, propriétés et fonctions**, de l'**arbre dans son écosystème** jusqu'au **bois matériau**.

SILVATECH est portée par l'UMR SILVA (1434) ainsi que l'UMR BEF (1138), l'UMR IAM (1136) et l'USC LERMAB (EA 4370) sous la tutelle d'INRAE, l'Université de Lorraine et AgroParisTech. Elle fait partie de l'Infrastructure de Recherche Forêt coordonnée par le département ECODIV d'INRAE et de l'Infrastructure Nationale de recherche pour la gestion adaptative des forêts IN-Sylva France.

SILVATECH apporte une **expertise analytique** et une **capacité de développement** aux unités de recherche régionales, nationales et internationales à travers un support renforcé aux **programmes de recherche intégratifs** (écologie, écophysiologie, biogéochimie, fonctionnement des écosystèmes forestiers-prairiaux-aquatiques, dendrométrie, anatomie et propriétés du bois, relations structure – propriétés, sciences du bois). Elle joue un rôle accru dans les réseaux nationaux et internationaux, les actions de formation régionales et européennes, l'attractivité auprès des chercheurs internationaux.

### Structure et outils disponibles

D'un point de vue fonctionnel, SILVATECH s'organise en 2 pôles techniques interconnectés :

#### *Pôle Isotopie-Chimie (IC)*

Ce pôle s'articule autour des couplages de spectrométrie, chromatographie, isotopie, plasma, dédiés à l'analyse des molécules aux matrices complexes (bois, sève, sol eau). Le Tab. 1 résume la liste des services proposés.

#### *Pôle Imagerie-Mesures Multi-Modales (I3M)*

On retrouve au sein de ce pôle des techniques d'imagerie haute-résolution électronique et confocale, cryomicroscopie-électronique, microanalyses X minérales, histologie et microscopie photonique, radiographie, tomographie et diffraction aux rayons X. Le Tab. 2 résume la liste des services proposés.

Ces deux pôles s'appuient également sur un **pôle transversal** de préparation des échantillons (microtomie et cryo-microtomie, lyophilisation, métallisation, broyages, micropesée, extractions) et de conception (bois, mécanique, impression additive).

Tab. 1: Services proposés par le pôle Isotopie-Chimie (IC)

Type de service	Technologie	Méthodes/paramètres acquis
Isotopie (Naturel/Enrichi)	Pyr-EA-IRMS (solide)	$\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ , $\delta\text{D}$ , $\delta^{18}\text{O}$
	Pyr-EA-IRMS ou laser (liquide)	$\delta\text{D}$ , $\delta^{18}\text{O}$
	GA-IRMS (gaz)	$\delta^{13}\text{C-CO}_2$
	ICP-MS (liquide)	$\delta^{44}\text{Ca}$ , $\delta^{26}\text{Mg}$
Isotopie moléculaire (Naturel/Enrichi)	IC/GC-IRMS (molécules)	$\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$
Analyses Elémentaires	EA (solide)	C, N, H, S
	ICP-MS (liquide)	Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Ga, Ge, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Zn
Biochimie	IC (molécules)	sucre solubles
	Spectrophotométrie – colorimétrie enzymatique (molécules)	sucre solubles, amidons

Tab. 2 : Services proposés par le Pôle Imagerie-Mesures Multi-Modales (I3M)

Type de service	Technologie	Méthodes/paramètres acquis
Microscopie électronique à balayage (MEB)	Conventionnelle	haute résolution, cryo-méthodes, reconstruction d'images haute résolution
	Pression contrôlée	platine Peltier, reconstruction d'images
	Pression étendue	
	Micro-analyse X	EDS, WDS, microfluorescence X, cartographie élémentaire
	Microscopie corrélative	optique-MEB, MEB-MEB, confocal-MEB
Microscopie photonique	Station d'imagerie	transmission, réflexion, mosaïque d'image, observation en profondeur de champ
	AxiImager M2	
	MacroZoom	
	Station dendrochronologique	
Histologie/préparation pour observations	Formation du bois	carottage, inclusions, coupes et colorations au FAGSA sur microcarottes, acquisition d'images
	Anatomie du bois, histologie végétales	découpe, inclusions, réalisation de coupes et coloration, acquisition d'images
	Accès aux outils de surfacage et coupe	cryotomie, microtomie, vibratomie
	Lyophilisation	-
Microdensitométrie et fluorescence X	ITRAX	carottage, usinage planches, radiographie, analyse densitométrique, microanalyse par fluorescence X
Tomographie Rayons-X	Scanner RX	débits d'échantillons, débits rondelles sur billon, scans
Diffraction RX	Diffraction sur bois massif et poudre	découpe plaquettes, angle de microfibrilles, mesure de la cristallinité sur poudre



## Accès

La **charte d'accès** à la plateforme SILVATECH, disponible en ligne (<https://silvatech.isc.inrae.fr/Media/Files/general/charte-silvatech-2022>), décrit les services proposés, la politique tarifaire associée, la politique de sécurité et d'accès aux données, les règles internes de fonctionnement, ainsi que les règles régissant la sécurité des personnes, des équipements, des échantillons et des données et les règles relatives aux citations et aux informations nécessaires à la prise en charge d'un projet.

## Contact et informations



<https://silvatech.isc.inrae.fr/>

<https://www6.inrae.fr/in-sylva-france/Services/In-lab/Silvatech>

[silvatech@inrae.fr](mailto:silvatech@inrae.fr)

## Analyse du comportement au feu d'essences de bois gabonais au cône calorimètre et au microcalorimètre de combustion.

MOUKETOU BEUMO Charnelle Steve<sup>1,2,3</sup>, VIRETTO Amandine<sup>1,2</sup>, SONNIER Rodolphe<sup>3</sup>, OMOUENDZE Priscilla Linda<sup>4</sup>, THEVENON Marie-France<sup>1,2</sup>, OTAZAGHINE Belkacem<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France

<sup>2</sup>BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>3</sup>Polymeres Composites and Hybrides (PCH), IMT Mines Alès, F-30319 Alès, France

<sup>4</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Cap Estérias, 3960 Libreville, Gabon

[charnelle\\_steve.mouketou\\_beumo@cirad.fr](mailto:charnelle_steve.mouketou_beumo@cirad.fr)

**Mots clés :** Comportement au feu ; Bois tropicaux ; Microcalorimètre de combustion ; Cône calorimètre

### Contexte et objectif

Le bois joue un rôle central dans l'économie gabonaise, représentant une ressource stratégique pour le développement industriel et la génération de revenus pour les populations. L'exploitation forestière est la troisième source de revenus du pays, après le pétrole et l'industrie minière, et sa contribution à l'économie nationale est considérable. L'importance de cette ressource est accentuée par la croissance continue de l'extraction de grumes, avec une augmentation des volumes extraits passant de 1,9 million de m<sup>3</sup> en 2012 à 3,7 millions de m<sup>3</sup> en 2020 (FAO 2020). Cette dynamique est également favorisée par les politiques de transformation locale imposées depuis 2010, visant à maximiser la valeur ajoutée des produits forestiers, cependant en créant une nouvelle source de déchets sur le territoire (Eyi Obame 2017). Dans ce contexte, notre étude vise à valoriser les déchets des essences de bois les plus exploitées au Gabon pour en faire des matériaux biocomposites pour des applications dans le domaine de l'habitat sous la forme de panneaux isolants et d'éléments non porteurs. Ces matériaux devront présenter des propriétés mécaniques satisfaisantes pour leur usage, une bonne durabilité face aux termites et aux champignons ainsi qu'un comportement au feu optimal. Pour atteindre ces objectifs, nous procéderons dans un premier temps à l'évaluation du comportement au feu des essences de bois sélectionnées. Dans un second temps, nous formulerons des matériaux bio-composites à partir des sciures de ces essences de bois que nous caractériserons en termes de propriétés mécaniques (compression et flexion), thermiques, de durabilité biologique et de réaction au feu afin d'évaluer leur utilisation dans le domaine de l'habitat.

### Matériels et méthodes

#### Matériels

Les échantillons proviennent de déchets de bois, comprenant de la sciure (mélange d'aubier et du duramen), des plaquettes d'aubier et de duramen ainsi que des morceaux d'écorce issus de cinq essences sélectionnées : Azobé (*Lophira olata*) avec une densité de 1,06 , Béli (*Julbernardia pellegriniana*) avec une densité de 0,77, Okan (*Cylicodiscus gabonunensis*) avec une densité de 0,91, Okoumé (*Aucoumea klaineana*) avec une densité de 0,44 et Tali (*Erythropheum suaveolens*) avec une densité de 0,91 (Gérard et al 2016). L'échantillonnage a été effectué sur des sites de transformation dans diverses régions du Gabon : l'Okoumé a été

collecté à Libreville auprès de la Société Équatoriale d'Exploitation Forestière (SEEF), le Tali à Makokou auprès de Bonus Harvest, l'Okan et l'Azobé à Essassa auprès de la Société de Mise en Valeur du Bois (SOMIVAB), et le Béli à Lastourville auprès de la Société du Bois de Koulamoutou (S.B.K.). Les cinq essences ont été choisies en raison de leur importance économique au Gabon, avec des volumes de déchets significatifs (Eyi Obame 2017, Seka et Béguin 2020). La Fig. 1 illustre les différents types d'échantillons collectés pour le Béli.

Très peu de travaux scientifiques ont porté sur le comportement au feu des bois tropicaux (Haurie 2019). En ce sens, notre étude est pionnière sur les essences gabonaises et de surcroît, nous allons également étudier le comportement au feu du duramen de l'Okan suivant les différents plans de coupe (tangential, radial et longitudinal).



Fig. 1 : Différents échantillons collectés pour le Béli : (a) sciure, (b) écorce, (c) aubier, (d) duramen

### Méthodes

L'étude du comportement au feu de nos échantillons a été réalisée à deux échelles.

À petite échelle, la réaction au feu des cinq essences a été analysée à l'aide d'un microcalorimètre de combustion (*Pyrolysis Combustion Flow Calorimeter*, PCFC), ces essais ont été faits en six répliques suivant la norme ASTM D7309 (2021). L'échantillon (2-3 mg) est introduit dans la chambre de pyrolyse sous atmosphère inerte, avec une montée en température linéaire de 1 K/s de 30 °C à 750 °C. Les produits volatils générés lors de la dégradation thermique sont ensuite transférés dans la chambre de combustion, où ils sont brûlés en présence d'un excès d'oxygène (mélange gazeux de 20 % O<sub>2</sub> et 80 % N<sub>2</sub>) à une température de 900 °C. Le débit calorifique est calculé par la méthode dite « de déplétion d'oxygène » (Huggett 1980). Les paramètres mesurés sont le débit calorifique (*Heat Release Rate*, HRR), l'énergie totale libérée par gramme (*Total Heat Release*, THR), la fraction massique résiduelle après pyrolyse, et l'énergie de combustion complète (*Heat of Complete Combustion*, HCC) qui correspond à l'énergie dégagée par gramme de gaz produit lors de la pyrolyse.

À une échelle intermédiaire, le comportement au feu des matériaux a été étudié à l'aide d'un cône calorimètre conformément à la norme NF ISO 5660-1 (2015), qui permet d'évaluer le débit calorifique et la production de fumée d'éprouvettes orientées horizontalement. Comme pour le PCFC, l'énergie libérée est déterminée par la méthode dite « de déplétion d'oxygène ». Des échantillons de duramen (10 cm x 10 cm x 3 cm) de chaque essence ont été exposés à un flux de chaleur radiatif constant de 50 kW/m<sup>2</sup> avec une ignition pilotée et un débit d'air contrôlé de 24 L/s. Les paramètres évalués sont le temps d'ignition (*Time to Ignition*, TTI), le pic de débit calorifique (*peak of Heat Release Rate*, pHRR), l'énergie totale libérée (*Total Heat Release*, THR), l'énergie effective de combustion (*Effective Heat of Combustion*, EHC) ainsi que la perte de masse.

### Résultats

Les essais réalisés au PCFC sur les différentes fractions des cinq essences de bois ont montré peu de différences entre les fractions aubier, duramen et sciure pour les différentes essences ;

les valeurs de pHRR sont comprises entre  $\text{pHRR}_{\text{Okan aubier}} = 116 \pm 3 \text{ W/g}$  et  $\text{pHRR}_{\text{Tali aubier}} = 158 \pm 7 \text{ W/g}$ , celles de HCC sont comprises entre  $\text{HCC}_{\text{Okan aubier}} = 10,3 \pm 0,3 \text{ kJ/g}$  et  $\text{HCC}_{\text{Okoumé duramen}} = 13,3 \pm 1,0 \text{ kJ/g}$ , celles de résidu sont comprises entre  $\text{Res}_{\text{Okoumé duramen}} = 0,12$  et  $\text{Res}_{\text{Okan aubier}} = 0,22$ . Les résultats obtenus sur les fractions aubier, duramen et sciure de l'Okan sont les plus intéressantes avec des valeurs de pHRR et de THR les plus faibles et des taux de résidus les plus importants. Cependant, les différences les plus significatives portent sur les résultats des fractions écorce comme nous pouvons le constater dans le Tab. 1. pour les différentes fractions du Béli. Les valeurs de pHRR et de THR sont divisées de moitié  $\text{pHRR}_{\text{Béli écorce}} = 53 \pm 3 \text{ W/g}$  et  $\text{THR}_{\text{Béli écorce}} = 5,3 \pm 0,3 \text{ kJ/g}$  et le résidu est augmenté significativement,  $\text{Res}_{\text{Béli écorce}} = 0,3$ . L'écorce, en tant que couche protectrice de l'arbre, semblerait présenter une inflammabilité plus faible pour les cinq essences. Cette observation est particulièrement vraie pour le Béli ( $\text{pHRR}_{\text{Béli écorce}} = 53 \pm 3 \text{ W/g}$ ) et le Tali ( $\text{pHRR}_{\text{Tali écorce}} = 31 \pm 2 \text{ W/g}$ ), un peu moins marquée pour l'Okan ( $\text{pHRR}_{\text{Okan écorce}} = 79 \pm 7 \text{ W/g}$ ) et l'Okoumé ( $\text{pHRR}_{\text{Okoumé écorce}} = 88 \pm 7 \text{ W/g}$ ) et encore moins pour l'Azobé ( $\text{pHRR}_{\text{Azobé écorce}} = 124 \pm 15 \text{ W/g}$ ). Cette observation entre l'écorce et les autres parties du bois est cohérente avec les résultats antérieurs obtenus sur des essences de bois guyanais (Bossu et al 2023).

Tab 1 : Résultats obtenus au PCFC pour les différentes fractions de Béli

Béli	pHRR (W/g)	TpHRR (°C)	THR (kJ/g)	HCC (kJ/g)	Fraction résiduelle
Ecorce	$53 \pm 3$	$375 \pm 7$	$5,3 \pm 0,3$	$7,7 \pm 0,4$	$0,31 \pm 0,03$
Aubier	$125 \pm 6$	$370 \pm 7$	$9,4 \pm 0,5$	$11,4 \pm 0,5$	$0,20 \pm 0,03$
Duramen	$135 \pm 13$	$384 \pm 8$	$9,8 \pm 0,9$	$12,2 \pm 0,7$	$0,15 \pm 0,02$
Sciure	$132 \pm 10$	$379 \pm 13$	$9,4 \pm 0,9$	$11,1 \pm 1,3$	$0,15 \pm 0,03$

Les essais réalisés au cône calorimètre sur les duramens d'Azobé, de Béli, d'Okan et d'Okoumé sont présentés dans le Tab. 2 et la Fig. 2, dans laquelle les courbes présentent l'évolution du débit calorifique en fonction du temps. Nous pouvons observer des différences significatives pour les temps d'ignition des quatre essences étudiées, où l'Okoumé a un TTI très court ( $\text{TTI}_{\text{Okoumé}} = 14 \pm 3 \text{ s}$ ) alors que l'Okan a un TTI bien plus long ( $\text{TTI}_{\text{Okan}} = 99 \pm 5 \text{ s}$ ), ce qui peut être imputé aux différences de densité. Dès l'ignition, une augmentation rapide du débit calorifique, due à l'inflammation des gaz volatiles produits lors de la pyrolyse, est observée conduisant rapidement à un premier pic de débit calorifique ( $\text{tpHRR}_{\text{Okoumé}} = 27 \pm 3 \text{ s}$  et  $\text{tpHRR}_{\text{Okan}} = 113 \pm 6 \text{ s}$ ). De plus, nous pouvons constater que le pHRR de l'Okan ( $\text{pHRR}_{\text{Okan}} = 132 \pm 3 \text{ kW/m}^2$ ) est bien plus faible que celui des trois autres essences ( $\text{pHRR}_{\text{Azobé}} = 166 \pm 2 \text{ kW/m}^2$ ,  $\text{pHRR}_{\text{Béli}} = 166 \pm 8 \text{ kW/m}^2$  et  $\text{pHRR}_{\text{Okoumé}} = 157 \pm 11 \text{ kW/m}^2$ ). Après le pHRR, les courbes montrent une diminution du débit calorifique, atteignant un plateau dans lequel la libération de chaleur devient plus stable en raison de la formation d'une couche de char protectrice. Le débit calorifique reste constant au niveau de ce plateau entre 400-1200 s pour les quatre essences. Néanmoins, le débit calorifique du plateau est plus élevé pour l'Azobé, le Béli et l'Okoumé (entre 55-70  $\text{kW/m}^2$ ) que pour l'Okan (entre 40-45  $\text{kW/m}^2$ ). Au-delà de 1200 s, une nouvelle augmentation de débit calorifique est observée pour l'Okoumé avec un second pHRR d'une valeur d'environ 95  $\text{kW/m}^2$ , ainsi que pour le Béli. L'essai ayant été stoppé à 1800 s pour tous les échantillons, les courbes ne montrent pas le second pHRR entièrement dessiné pour le Béli, mais la première partie visible de ce pic laisse présager d'une valeur de pic beaucoup plus élevée que pour l'Okoumé. L'apparition de ces seconds pHRR est due au fait que le front de température atteint le bas de l'échantillon, lequel est thermiquement isolé par la laine de roche. La chaleur ne s'évacue plus, et la température ré-augmente entraînant à son tour une augmentation de la vitesse de pyrolyse. De la même manière, étant donné que l'essai a été interrompu à 1800 s, les seconds pHRR de l'Azobé et de l'Okan ne sont pas visibles, mais si

nous avons poursuivi l'essai plus longtemps, nous aurions alors observé le même phénomène pour ces deux essences que pour le Béli.

### Conclusion et perspectives

Au-delà de l'étude de ces cinq essences de bois, l'ambition de cette étude est de pouvoir évaluer la variabilité du comportement au feu du bois, d'une essence à l'autre et suivant la partie du bois étudiée. L'objectif est également de prédire les principales valeurs caractéristiques mesurées au cône calorimètre en fonction de la géométrie de l'échantillon et des grandeurs mesurées au PCFC.

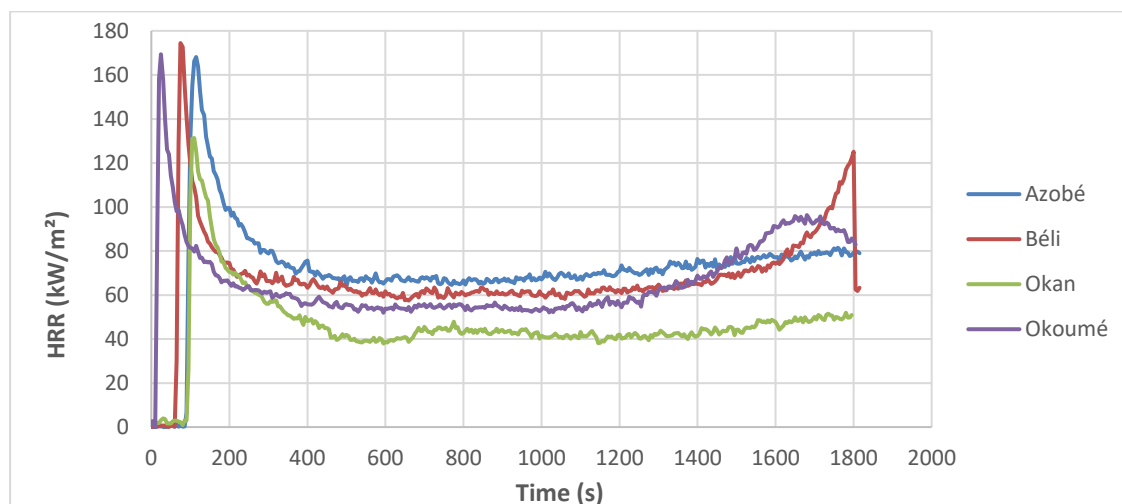


Fig. 2 : Courbes de débit calorifique (HRR) obtenues au cône calorimètres pour les duramens des différentes essences (irradiance 50 kW/m<sup>2</sup>)

Tab. 2 : Résultats obtenus au cône calorimètre pour les duramens des différentes essences

Essences	TTI (s)	pHRR (kW/m <sup>2</sup> )	tpHRR (s)	THR (kJ/g)
Azobé	84 ± 6	166 ± 2	107 ± 7	3,3 ± 0,3
Béli	59 ± 11	166 ± 8	85 ± 13	5,6 ± 2,0
Okan	99 ± 5	132 ± 3	113 ± 6	2,3 ± 0,0
Okoumé	14 ± 3	157 ± 11	27 ± 3	8,9 ± 0,3

Les résultats au PCFC mettent en évidence des différences significatives selon les différentes parties du bois testées, notamment pour les écorces de Tali et de Béli qui présentent des valeurs de débit calorifique (pHRR) et de chaleur totale libérée (THR) bien plus faibles que les autres fractions (duramen, aubier, sciure) mais également que celles des écorces des autres essences. Pour ce qui est des résultats au cône calorimètre, l'Okan se distingue de l'Azobé, du Béli et de l'Okoumé par un temps d'ignition bien plus élevé, et un débit calorifique plus faible sur la totalité de l'essai.

Des essais complémentaires sont en cours, notamment des essais au feu sur l'influence du plan de coupe des échantillons ainsi que des analyses de composition chimique des différentes fractions pour chacune des essences de bois étudiées.

### Remerciements

Les auteurs remercient la Société Équatoriale d'Exploitation Forestière (SEEF), la Société de Mise en Valeur du Bois (SOMIVAB), la société BONUS HAVEST et la Société du Bois de Koulamoutou (S.B.K.) pour leur aide et leur entière collaboration dans l'échantillonnage de nos

produits. Les auteurs remercient également l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG) pour son programme de financement de doctorat à l'international.

### Références

ASTM D7309 (2021) Standard Test Method for Determining Flammability Characteristics of Plastics and Other Solid Materials Using Microscale Combustion Calorimetry, ASTM International

Bossu J, Moreau J, Delisée C, Le Moigne N, Corn S, Sonnier R, Viretto A, Beauchêne J, Clair B (2023) Revealing the potential of waste fibers from timber production and clearings for the development of local bio-based insulation fiberboards in French Guiana, *Waste and Biomass Valorization*, 14:4281-4295.

Eyi Obame AP (2017) Niveau de valorisation des déchets d'exploitation forestière : identification et estimation des rebuts de bois dans l'AAC 2014 de la SEEF à Nzamaligue, mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Techniques des Eaux et Forêts.

FAO (2020) Evaluation des ressources forestières mondiales – Principaux résultats.

Gérard J et al (2016) Atlas des bois tropicaux, éditions Quae, 1000 p.

Haurie L, Giraldo MP, Lacasta AM, Monton J, Sonnier R (2019) Influence of different parameters in the fire behavior of seven hardwood species, *Fire Safety Journal*, 107:193-201.

Hugget C (1980) Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *Fire and Materials*, 4(2):61-65.

NF ISO 5660-1 (2015) Essais de réaction au feu — Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse, Partie 1 : Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique), AFNOR

Seka MJ, Bégin J (2020) Estimation des volumes bruts exploitables d'Okan (*Cylicodiscus gabunensis* harms) au Sud du Cameroun, *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo*, 15 :24-34.

## Caractéristiques anatomiques d'espèces tropicales de différents tempéraments écologiques

NKENE MEZUI Estelle<sup>1,2,3</sup>, BRANCHERIAU Loïc<sup>2</sup>, IKOGOU Samuel<sup>3,4</sup>,  
MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,3,5</sup>

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

<sup>2</sup>Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement  
(CIRAD), Unité de Recherche BioWooEB, 34398 Montpellier, France

<sup>3</sup>Laboratoire de Recherche et Valorisation du matériau Bois (LaReVaBois), 3960 Libreville,  
Gabon

<sup>4</sup>Ecole Polytechnique de Masuku (EPM-USTM), Franceville, Gabon

<sup>5</sup>CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

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

**Mots clefs :** feuillus tropicaux du Gabon ; tempérament écologique ; caractéristiques anatomiques

### Contexte et objectifs

Un arbre a besoin de lumière pour sa croissance et son développement. Chez certaines espèces cependant, il est possible de tolérer l'ombre tout ou une partie de leur vie sans que cela ne nuise à leur développement. Il est ainsi possible de regrouper les espèces en différentes classes avec des degrés de tolérance à l'ombre différents à savoir les pionniers, les hémi-héliophiles et les tolérants à l'ombre. L'étude des traits anatomiques de ces différentes espèces est intéressante pour mieux comprendre cette biodiversité mais également pour l'élaboration de la qualité du bois compte tenu des liens existants entre l'anatomie et les propriétés mécaniques par exemple. De plus, pour la grande majorité de ces essences gabonaises, un tel travail n'avait pas encore été réalisé. La fonction de soutien mécanique d'un arbre renvoie à l'ensemble des mécanismes qui lui permettent de supporter sa propre masse, de contrôler sa posture et d'éviter des dommages liés à des facteurs comme le vent. Chez les feuillus, elle est principalement liée aux caractéristiques des fibres, c'est la raison pour laquelle nous avons choisi de mesurer les longueurs et les épaisseurs des fibres de nos espèces.

### Matériel et méthodes

L'étude porte sur 15 espèces d'arbres feuillus tropicaux du Gabon prélevés sous forme de plateaux au parc à bois de la maison de la technologie du CIRAD à Montpellier. Ceux-ci ont été répartis en trois tempéraments écologiques distincts (Tab. 1). Le tempérament écologique peut être défini comme un ensemble de stratégies des arbres à croître, survivre et à se reproduire dans des conditions de lumière particulières en fonction du stade de développement (Oldeman et Van Dijk 1991). Chacun des tempéraments, pionnier (P), hémi-héliophile (HH) et tolérant à l'ombre (TO), compte 5 espèces et 6 échantillons (éprouvettes) par espèce. Les espèces pionnières représentent des espèces qui ne peuvent en aucun cas tolérer l'ombre quel que soit le stade de développement (Swaine & Whitmore 1988). Les espèces hémi-héliophiles ont un fort besoin de lumière durant tout leur cycle, mais peuvent supporter l'ombre de manière temporaire (Fourdrigniez et Meyer 2008). Enfin, les espèces tolérantes à l'ombre sont des espèces capables de s'installer dans la canopée même avec un faible apport de lumière (Canham 1989, Gravel et al 2010). Les tempéraments des espèces sont tirés de Meunier et al (2015) et

Bénédet et al (2019). Les noms vernaculaires et les familles botaniques des espèces étudiées sont tirés d'une part du livre "Atlas des Bois Tropicaux" (Gérard et al 2016) et du livre "La forêt du Gabon" (De Saint Aubin 1963).

Tab. 1 : Espèces étudiées, familles botaniques et tempéraments écologiques associés. N\_tot : nombre total d'échantillons par espèce ; Temp : Tempérament écologique

Temp	Espèces	Noms vernaculaires	Famille botanique	N_tot
<b>Pionnier (P)</b>	<sup>1</sup> <i>Anthocleista nobilis</i> G.Don	Ahinebe	<i>Gentianaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre	Ovok	<i>Annonaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Croton oligandrus</i> Pierre	Ngueul / Obamba	<i>Euphorbiaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Discoglyprena caloneura</i> Prain	Atieghe	<i>Euphorbiaceae</i>	6
	<sup>2</sup> <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms	Nieuk	<i>Mimosaceae</i>	6
	<b>Total (P)</b>			<b>30</b>
<b>Hémi-héliophile (HH)</b>	<sup>2</sup> <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr.	Ossabel	<i>Burseraceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms	Tola	<i>Caesalpiniaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Parkia bicolor</i> A.Chev.	Essang	<i>Mimosaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb.	Ozouga	<i>Humiriaceae</i>	6
	<sup>2</sup> <i>Scyphocephalum mannii</i> Warb.	Sorro	<i>Myristicaceae</i>	6
	<b>Total (HH)</b>			<b>30</b>
<b>Tolérant à l'ombre (TO)</b>	<sup>2</sup> <i>Beilschmiedia</i> spp. Nees	Nkonengui / Kanda	<i>Lauraceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe	Faro	<i>Caesalpiniaceae</i>	6
	<sup>2</sup> <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh.	Alep	<i>Irvingiaceae</i>	6
	<sup>2</sup> <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms	Omvong / Eyoum	<i>Caesalpiniaceae</i>	6
	<sup>1</sup> <i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre	Andong	<i>Scytopetalaceae</i>	6
	<b>Total (TO)</b>			<b>30</b>
<b>Total = Total (P) + Total (HH) + Total (TO)</b>				<b>90</b>

<sup>1</sup>(Bénédet et al 2019) ; <sup>2</sup>(Meunier et al 2015)

### Mesure des longueurs des fibres : dilacération

La dilacération est un essai qui consiste à mesurer les longueurs des fibres de bois. Le procédé utilisé est celui de Franklin (Normand 1998). Au total, 90 éprouvettes ont été testées. La durée d'une mesure pour une éprouvette est d'environ 50 heures. La Fig. 1 résume le protocole utilisé. Compte tenu de la difficulté à mesurer des fibres de bois directement, il était nécessaire de passer par la création d'image à l'aide d'un microscope instrumenté de marque Olympus BX60 (Fig. 1). La mesure des longueurs des fibres est faite grâce au logiciel d'analyse d'image ImageJ. Par éprouvette, 12 à 20 images étaient nécessaires pour pouvoir mesurer 50 fibres. La moyenne des 50 mesures représentait la longueur moyenne des fibres d'une éprouvette.

### Mesure des épaisseurs de parois des fibres

Afin de déterminer les épaisseurs des fibres des échantillons des espèces étudiées, des coupes minces (étape 1 de la Fig. 2) ont été réalisées à l'aide d'un microtome à bois avec une épaisseur de coupe comprise entre 25 et 30  $\mu\text{m}$ . Les échantillons ont été préalablement immergés dans une solution composée d'eau déminéralisée, de glycérol et d'alcool à 95° afin de les ramollir et ainsi rendre la coupe plus facile. Les coupes obtenues ont ensuite été colorées à l'aide d'une solution de bleu de toluidine à l'alcool. Des images des coupes ont été réalisées grâce au microscope numérique Keyence (étape 2 de la Fig. 2) du laboratoire AMAP à Montpellier et les mesures des épaisseurs radiale et tangentielle des parois des fibres des échantillons ont été faites une fois de plus à l'aide du logiciel ImageJ. Les épaisseurs radiale et tangentielle



correspondent respectivement à des mesures effectuées parallèlement et perpendiculairement aux rayons du bois (étape 3 de la Fig. 2). Au total, 30 mesures ont servi à déterminer la moyenne par échantillon.

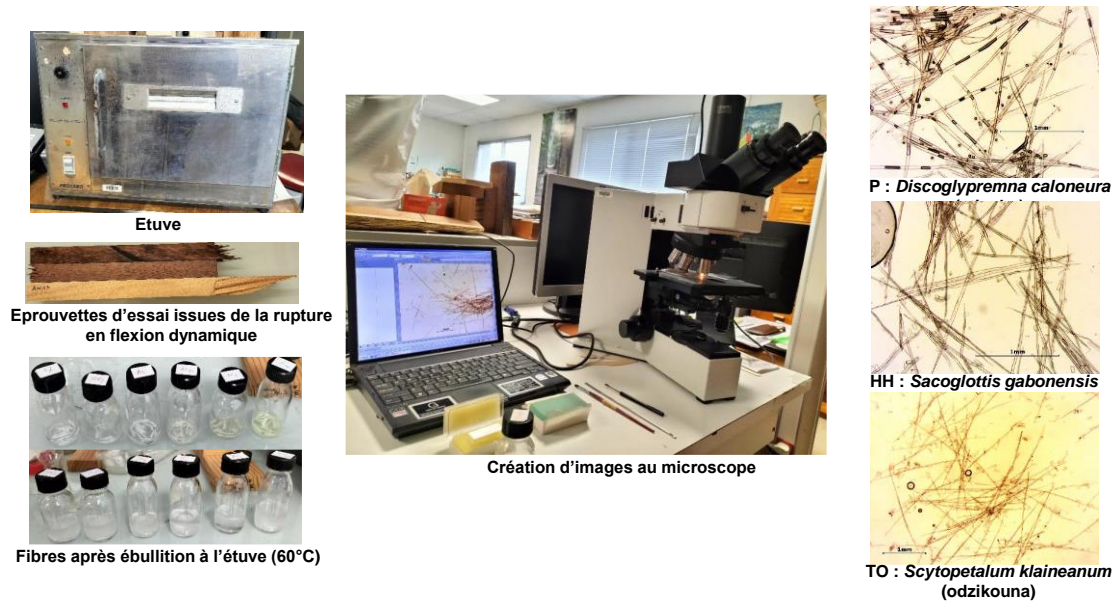


Fig. 1 : Processus de détermination des longueurs des fibres.  
P : pionnier, HH : héli-héliophile et TO : tolérant à l'ombre.

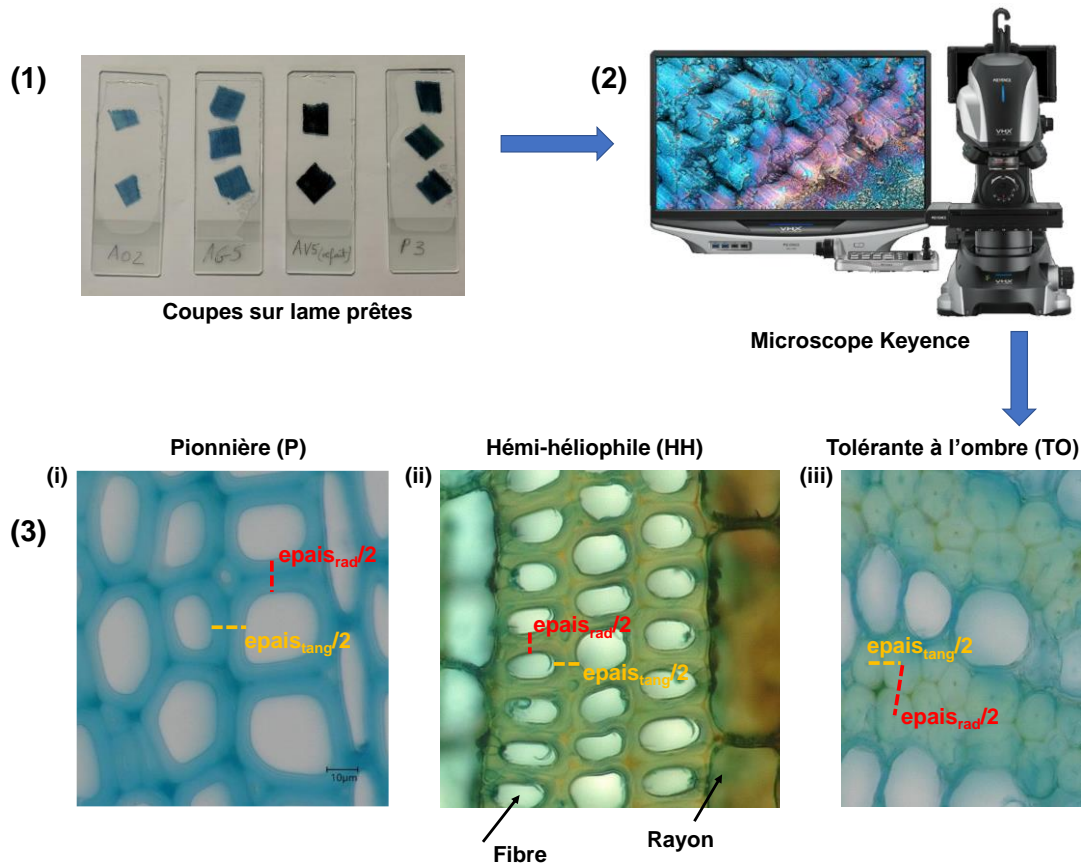


Fig. 2 : Mesures des épaisseurs des parois des fibres.  
 $epais_{tang}$  et  $epais_{rad}$  correspondent respectivement aux épaisseurs tangentielle et radiale

## Résultats et analyses

Les résultats des mesures ont été analysés grâce au logiciel R. Des tests non paramétriques ont été préférés aux tests paramétriques en raison de la non normalité et de la non homogénéité des variances de nos données suivant le tempérament écologique.

Tab. 2 : Résultats du test de Kruskal-Wallis et du test de comparaisons multiples de Dunn sur les caractéristiques anatomiques du bois, montrant l'importance des différences dans les profils écologiques des arbres étudiés.

Caractéristiques anatomiques	Test de Kruskal-Wallis	Test de Dunn		
	<i>p</i> -values	P-HH	HH-TO	TO-P
<i>LF</i> (mm)	1.69E-01 "ns"	ns	ns	ns
<i>epais_tang_moy_pari</i> (μm)	4.74E-05 "****"	ns	**	***
<i>epais_rad_moy_pari</i> (μm)	3.47E-06 "****"	ns	**	***

ns : non significatif ; significativité des *p*-values : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 '' 1. 'P' pionnier ; 'HH' héliophile ; 'TO' tolérant à l'ombre.

*LF* : longueur des fibres ; *epais\_tang\_moy\_pari* : épaisseur tangentielle moyenne des parois des fibres ; *epais\_rad\_moy\_pari* : épaisseur radiale moyenne des parois des fibres

Les résultats du test de Kruskal-Wallis (Tab. 2) indiquent une influence positive du tempérament écologique sur les épaisseurs des fibres mais pas sur les longueurs des fibres. Par conséquent, on ne saurait comparer les longueurs des fibres suivant les différents tempéraments. Les comparaisons multiples de Dunn (Tab. 2) montrent que les différences sont beaucoup plus significatives entre le groupe des pionniers et celui des tolérants à l'ombre (TO-P). Les pionniers et les héliophiles (P-HH) ont statistiquement des dimensions de parois des fibres identiques. La Fig. 3 présente les résultats du test de Dunn de façon détaillée.

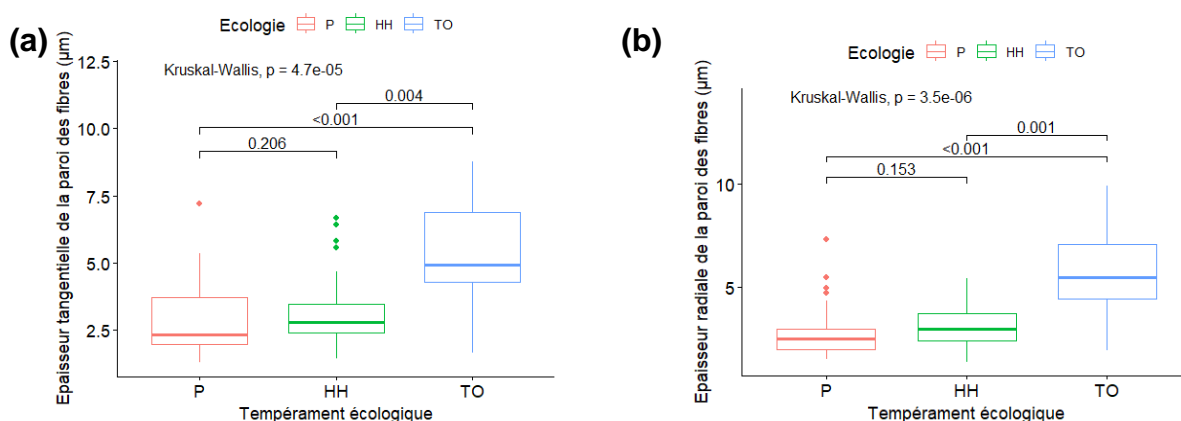


Fig. 3 : Distribution des caractéristiques anatomiques statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. P : pionnier ; HH : héliophile et TO : tolérant à l'ombre

On observe que les tolérants à l'ombre ont des parois des fibres plus épaisses que celles des héliophiles et beaucoup plus que celles des pionniers (Fig. 3). Une étude récente (González-Melo 2022) corrobore nos résultats. En effet, l'auteur a pu démontrer d'une part que les espèces d'ombre ont des parois très épaisses qui favorisent la défense contre les pathogènes et les herbivores. D'autre part, il a montré que les espèces exigeantes en lumière ont des parois plus fines qui favorisent avec une densité de bois faible la croissance dans les trouées car ces deux paramètres réduisent les coûts de construction des tiges. Par ailleurs, d'après la bibliographie (Trouy 2015), la fonction de soutien mécanique est davantage liée aux caractéristiques des fibres chez les feuillus. D'après les résultats des épaisseurs des parois des

fibres, on peut déduire que les espèces d'ombre ont un soutien mécanique plus efficace par rapport à celui des espèces pionnières et héliophiles.

### Conclusion et perspectives

Notre travail a permis de déterminer les caractéristiques des fibres d'espèces d'arbres feuillus tropicaux du Gabon aux tempéraments écologiques différents. Nous pouvons retenir que les espèces d'ombre ont les fibres les plus épaisses et par conséquent auraient la fonction de soutien mécanique la plus optimale bien que les longueurs des fibres n'aient pas été un paramètre déterminant pour la spécialisation en tempérament écologique. Il serait intéressant pour la suite de déterminer les proportions des fibres et d'autres caractéristiques anatomiques cette fois liées à la fonction de conduction de l'arbre afin d'une part de confirmer la performance mécanique des espèces d'ombre et d'autre part d'évaluer les systèmes de conduction les plus efficaces.

### Références

- Bénédet F, Doucet J-L, Fayolle A, Gillet J-F, Gourlet-Fleury S, Vincke D (2019) CoForTraits, African plant traits information database. CIRAD Dataverse, V1. <https://doi.org/10.18167/DVNI/Y2BIZK>
- Canham CD (1989) Different Responses to Gaps Among Shade-Tolerant Tree Species (Vol. 70, Issue 3).
- De Saint Aubin G (1963) La Forêt Du Gabon (CIRAD-Forêt (Ed.)).
- Fourdrigniez M, Meyer, J-Y (2008) Liste et caractéristiques des plantes introduites naturalisées et envahissantes en Polynésie française par. Contribution à La Biodiversité de Polynésie Française, N°17, 62 + Annexes.
- Gérard J, Guibal D, Paradis S, Cerre, J-C (2016) L'Atlas des bois tropicaux.
- González-Melo A (2022) Wood anatomical traits mediate life-history variations at the sapling, but not at the adult stage. *Trees - Structure and Function*, 36(4), 1337–1347. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02293-1>
- Gravel D, Canham CD, Beaudet M, Messier C (2010) Shade tolerance, canopy gaps and mechanisms of coexistence of forest trees. *Oikos*, 119(3), 475–484. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17441.x>
- Meunier Q, Doucet J-L, Moumougou C (2015) Les Arbres Utiles du Gabon.
- Normand D (1998) Manuel d'identification des bois commerciaux Tome 1 - Généralités (175 p. ISBN 2-87614-317-8 CIRAD-Forêt (Ed.); Quae).
- Oldeman RAA, Van Dijk J (1991) Diagnosis of the temperament of tropical rain forest trees. In *Rain Forest Regeneration and Management*, 6, 21–65.
- Swaine MD, Whitmore TC (1988) On the Definition of Ecological Species Groups in Tropical Rain Forests. In *Source* (Vol. 75, Issue 1). *Vegetatio*. <https://www.jstor.org/stable/20038279>
- Trouy MC (2015) Anatomie du bois: Formation, fonctions et identification.

## Phénobois : plateforme de phénotypage des propriétés physico-chimiques du bois et hydrauliques des arbres

BOIZOT Nathalie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>INRAE, UMR INRAE-ONF BioForA 0588, 45075 Orléans – France

<sup>2</sup>INRAE, Plateforme Phénobois, 45075 Orléans – France

[nathalie.boizot@inrae.fr](mailto:nathalie.boizot@inrae.fr)

**Mots clés :** Bois ; Infra-rouge ; Chimie ; Microtomographie ; Microdensitométrie ; Hydraulique ; Cavitation ; Broyage

### Présentation générale

Phénobois propose une large gamme de mesures d'appréciation directe ou indirecte de paramètres phénotypiques en lien avec les propriétés structurales, physiques et chimiques du bois. La plateforme répond aux besoins de la communauté scientifique académique nationale, internationale et de la filière forêt-bois pour progresser dans l'analyse des grandes problématiques d'avenir concernant la forêt et la sylviculture.

Elle comprend du personnel hautement qualifié et des équipements technologiques de pointe distribués au sein de trois unités de recherche INRAE : BioForA (Centre Val de Loire, site d'Orléans), BIOGECO (Centre Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux, sites de Cestas et Pessac) et PIAF (Centre Auvergne-Rhône-Alpes, site de Crouël).

Les outils de phénotypage développés par Phénobois permettent de (1) caractériser le bois et comprendre les processus d'élaboration de ce tissu, (2) étudier l'adaptation et la réponse des arbres au stress hydrique, (3) identifier les ressources génétiques forestières capables de s'adapter aux climats changeants de demain tout en produisant du bois de qualité et en quantité.

Phénobois met en œuvre une approche multi-échelle allant de la cellule jusqu'à la caractérisation du bois des arbres issus de populations naturelles ou des programmes d'amélioration génétique. Selon les technologies mises en œuvre, la plateforme atteint des capacités d'analyses à haut débit, soit plusieurs milliers d'échantillons par an (Fig. 1).

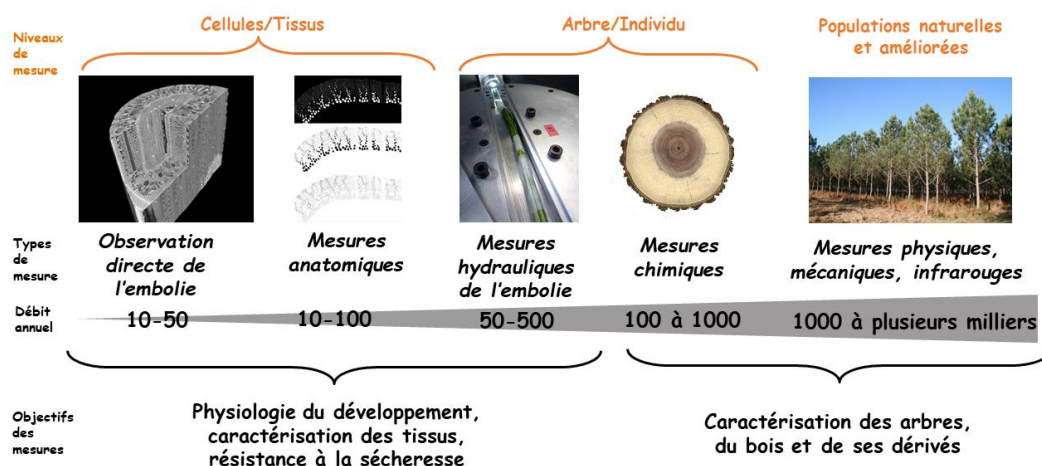


Fig. 1 : Caractéristiques des mesures phénotypiques proposées par la plateforme Phénobois

La plateforme participe ainsi aux projets de recherche dans les domaines de la génétique quantitative, l'écophysiologie, la génomique, l'anatomie et la dendrochronologie. Ses

compétences en chimie du bois permettent également à Phénobois de répondre aux besoins grandissants de la R&D industrielle dans la valorisation du bois et de ses dérivés.

### Les services proposés

Phénobois organise ses services d'analyse et de développement autour des expertises et technologies suivantes (Fig. 2) :

- Préparation des échantillons végétaux : découpe, sciage, broyage et tamisage
- Analyse de la composition chimique du bois : constituants structuraux (cellulose, hémicellulose, lignine) et extractibles impliqués dans la couleur et la durabilité naturelle (polyphénols, sucres solubles non structuraux)
- Analyse des propriétés physiques du bois : détermination des variations de densité du bois à l'intérieur des cernes de croissance par microdensitométrie aux rayons X, mesure de couleur et d'infradensité
- Étude de l'hydraulique des arbres pour la compréhension de leur stratégie de résistance à la sécheresse : mesure de la conductance hydraulique, suivi de l'apparition et de la propagation de l'embolie dans les feuilles, mesure de la transpiration résiduelle
- Observations non-destructive en 3D de la structure anatomique et de l'architecture hydraulique, suivi de l'embolie vasculaire par microtomographie à rayons X
- Évaluation indirecte des propriétés chimiques, physiques et hydrauliques du bois et discrimination d'espèces par spectrométrie infrarouge en laboratoire et *in situ*

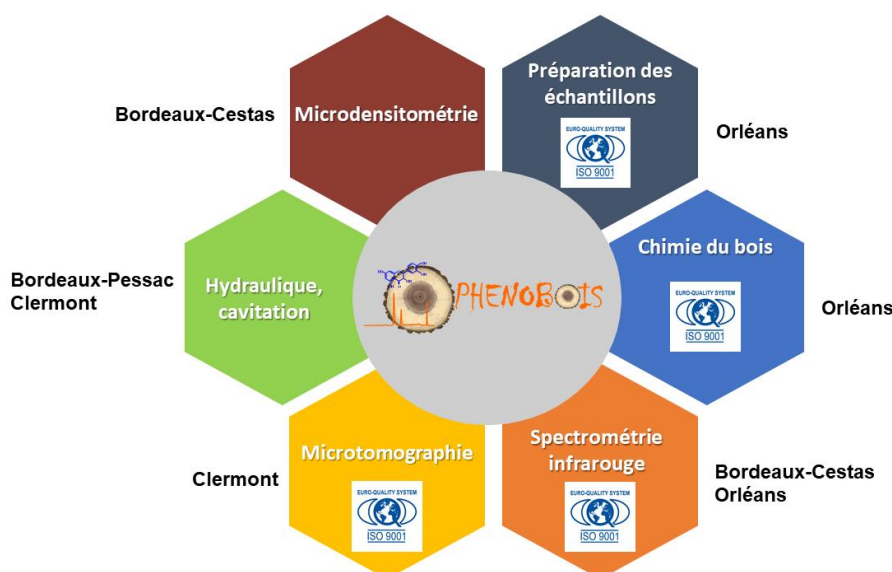


Fig. 2 : Analyses et technologies déployées par les sites de la plateforme Phénobois

### Accès aux services de la plateforme

Les modalités d'utilisation des services ainsi que les règles de fonctionnement sont décrites dans la Charte d'accès à la Plateforme Phénobois.

Tout contact doit se faire par courriel : [contact-phenobois@inrae.fr](mailto:contact-phenobois@inrae.fr).

Les demandeurs sont alors orientés vers un correspondant Phénobois pour échanger sur le projet scientifique et formuler leurs attentes vis-à-vis de la plateforme. Selon les modalités de sélection décrites dans la Charte, un avis quant à la faisabilité du projet est émis, ainsi qu'une estimation du coût et des délais de réalisation.

Pour tout projet recevable, Phénobois s'engage à mettre à disposition du personnel formé et compétent, proposer des équipements performants et entretenus, apporter une assistance technique voire une expertise scientifique, réaliser les analyses ou former les utilisateurs à leur réalisation, informer de l'état d'avancement du projet et accompagner les utilisateurs dans la valorisation de leurs données.

### **Contacts**

<https://phenobois.hub.inrae.fr/>

[contact-phenobois@inrae.fr](mailto:contact-phenobois@inrae.fr)



## Prise en compte du bois de tension dans un modèle de séchage des placages

KACHOUH Cyril, DENAUD Louis, VIGUIER Joffrey, GIRARDON Stéphane,  
MARCEL-MATHEY Thibaud

LaBoMaP, Arts et Métiers Sciences et Technologies, Rue Porte de Paris 71250 Cluny,  
France

[cyril.kachouh@ensam.eu](mailto:cyril.kachouh@ensam.eu)

**Mots clefs :** Détection du Bois de tension ; FTIR ; Modèle numérique ; Placage ; Séchage

### Contexte et objectifs

#### *Contexte de la thèse*

Le bois et spécifiquement les panneaux à base de bois, type contreplaqué, possèdent une variabilité intrinsèque due à son origine naturelle. Dans un contexte où l'industrie est de plus en plus automatisée, des variations de formes dues au procédé ou à la présence de singularités dans le matériau peuvent entraver le fonctionnement des process, comme par exemple, des difficultés de préhension par robot. La Fig. 1 présente deux piles de placages après séchage. Celle de droite présente des placages très déformés.



Fig. 1 : Variabilité de la qualité des placages dans l'entrepôt de l'entreprise Bois déroulé de l'Auxois

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension et de modéliser les phénomènes des déformations des placages. Pour ce faire, nous souhaitons intégrer au modèle les propriétés physiques et mécaniques locales du bois. Une des singularités du bois qui a un fort impact sur le séchage est le bois de tension.

#### *Objectifs de cartographie du bois de tension*

D'après Clair (2013), lorsqu'un arbre tente de se redresser, il forme un bois entraînant une précontrainte ponctuelle. Ce bois est appelé chez les angiospermes « bois de tension ». Cette zone va mettre en traction la structure pour la redresser. Pour ce faire, sa composition doit forcément différer de celle du bois dit « normal ». Un état de l'art des études sur le bois de tension réalisé par Huges (1965) montre une différence de composition chimique. Le bois de tension contient plus de cellulose et moins d'hémicellulose que le bois normal. Cette constatation est appuyée dans l'HDR de Bruno Clair (2013) et par Vilkovská et al (2024) qui

présentent la structure de la paroi cellulaire du bois de tension. Comme montré dans la Fig. 2, le bois « normal » présente une paroi primaire et une lamelle mitoyenne autour de trois couches de microfibrilles (de S1 à S3). Le bois de tension ne présente pas de couche S3 riche en hémicellulose et en cellulose et possède une couche S2 plus fine. Une couche G plus épaisse que la couche S3 prend le pas. Cette couche est composée en majorité de cellulose cristallisée.

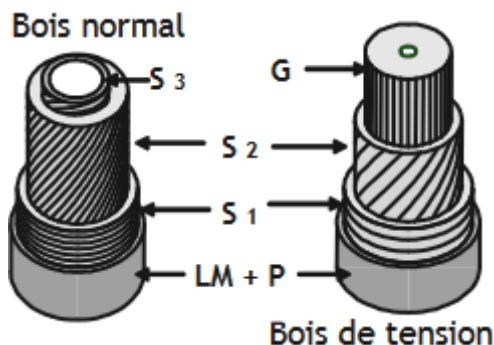


Fig. 2 : Schéma de la structure cellulaire des parois de bois normal et de bois de tension par Bruno Clair (2013)

A l'échelle macroscopique, le bois de tension est caractérisé par des propriétés mécaniques très différentes de celles du bois normal. Le bois de tension est caractérisé par un retrait longitudinal non négligeable. En effet, le bois de tension est un facteur important de fissuration des produits de première transformation lors du séchage. Grzeskowiak et al (1995) ont réalisé des éprouvettes en déroulant du peuplier et en découpant des rectangles dans les placages. Ils ont mesuré les déformations de ces éprouvettes après séchage. La Fig. 3 montre l'importance de prendre en compte le bois de tension si on souhaite prédire le séchage. Le retrait longitudinal du bois de tension peut être dix fois supérieur à celui du bois normal.

Dans la suite, nous utiliserons la méthode que Grzeskowiak et al (1995) utilisent pour détecter le bois de tension. Il s'agit d'une méthode chimique permettant de colorer le bois de tension avec du chlorure de zinc. Le produit est appliqué sur la tranche des billons et le bois de tension réagit et se colore de manière sombre. Doğu et al (2010) ont comparé cette méthode avec d'autres produits. Le chlorure de zinc reste très efficace sur le peuplier. Notre objectif est d'obtenir une cartographie du bois de tension non pas sur la tranche, mais sur le placage. Une méthode non destructive est donc à développer.

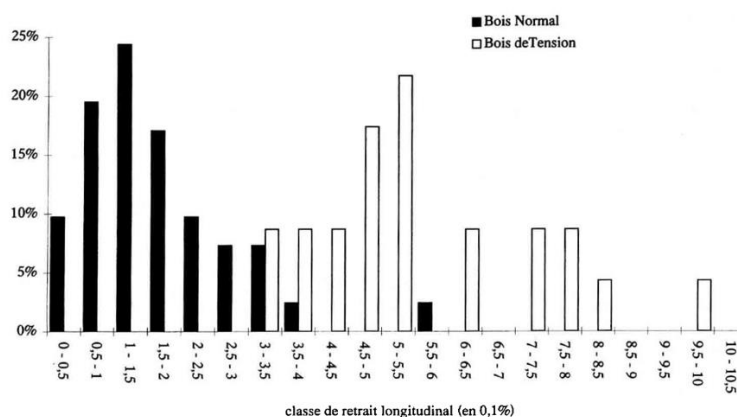


Fig.3 : présentation de la classification des éprouvettes en fonction de leur retrait longitudinal pour des éprouvettes marquées par du bois de tension et des éprouvettes normales Grzeskowiak et al (1995)



## Matériel et méthodes

Une solution de chloroiodure de zinc est diluée en 1:2 avec de l'eau distillée. Des rondelles de peuplier sont tronçonnées de chaque côté d'un billon. La solution est appliquée sur les rondelles. Les zones colorées sont ensuite reportées sur le billon au marqueur (Fig. 4). Ce billon est déroulé avec la dérouleuse du LaBoMaP afin de produire des placages de 3.5mm d'épaisseur. La solution est à nouveau appliquée sur un placage marqué afin de faire apparaître le bois de tension dans le plan du placage (Fig. 5).

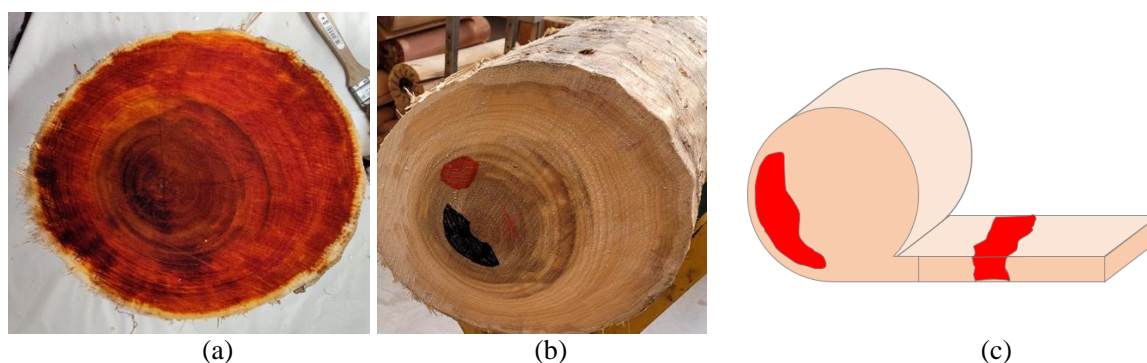


Fig. 4 : Application de la solution sur une rondelle (a) et report des zones centrales sur le billon (b). Schéma de principe du repérage du bois de tension (c)



Fig. 5 : Application de la solution sur un placage. Mises en évidence de bandes de bois de tension

## Résultats et perspectives

Nous avons réussi à reproduire la méthode de Grzeskowiak et al (1995). Même sur un placage, la solution colore suffisamment le bois de tension. Cette méthode nous servira de référence dans la suite. En effet, le chloroiodure de zinc est un produit dont l'utilisation est problématique dans l'industrie (coûts, manutention, composés volatiles...) et il dégrade les placages. Une méthode par spectroscopie infra-rouge est prévue courant 2025. Colom et al (2003) et Vilkovská et al (2024) ont utilisé de la spectroscopie afin d'observer la différence de composition chimique entre le bois normal et le bois de tension à différentes longueurs d'ondes. Par exemple, la double liaison C=C présente dans la lignine émet dans une bande caractéristique autour de  $1510\text{ cm}^{-1}$  (Fig. 6). Cette méthode pourrait permettre de détecter le bois de tension dans les placages de façon non destructives, et même en ligne sur les sites industriels.

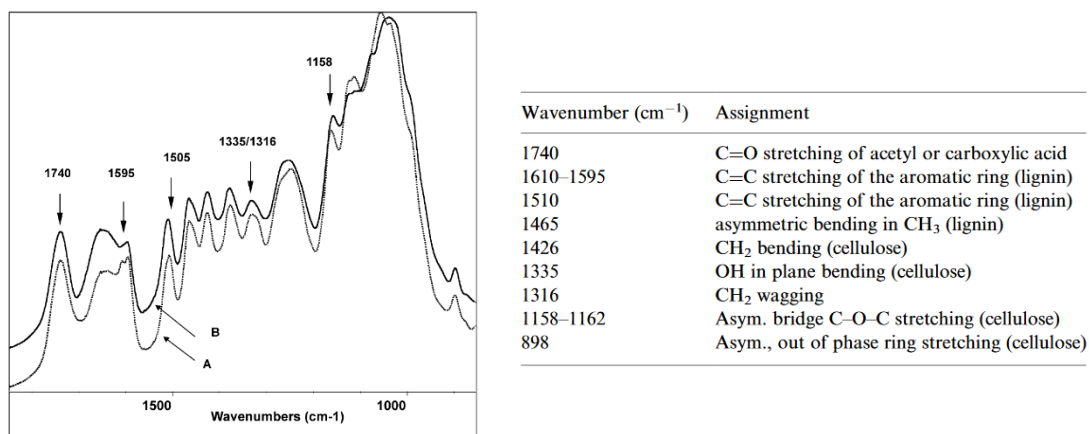


Fig. 6 : Piques d'absorbance du bois pour différentes longueurs d'ondes et bandes caractéristiques de différentes composantes atomiques selon Colom et al (2003)

## Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet MADEPLA financé par le conseil régional Bourgogne Franche-Comté

## Références

- Clair B (2013) Enquête sur le comportement paradoxal du bois de tension, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Montpellier 2,
- F. Huges F (1965) Tension wood: a review of literature, *Forestry Abstracts*, vol 26, p 179-186
- Vilkovská T, Klement I, Vilkovský P, Čunderlík I, Geffert A (2024) Chemical reagent for detecting tension wood in selected tree species, *BioResources* 19(3), 4335-4351
- Grzeskowiak V, Sassus F, Fournier M (1995) Coloration macroscopique, retraits longitudinaux de maturation et de séchage du bois de tension du peuplier (*Populus x euramericana* cv I.214), *Ann Sci For* (1996) 53, 1083-1097
- Doğu et Grabner (2010) A staining method for determining severity of tension wood, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry: Vol. 34: No. 5, Article 3*
- Colom X, Carrillo F, Nogués F, Garriga P (2003) Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy, *Elsevier, Polymer Degradation and Stability* 80 (2003) 543–549

## **Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement hygromécanique transverse contraint des bois dans leur diversité d'usages**

CHAMBRY Matisse, MONTERO Cédric, ALMERAS Tancrede, JULLIEN Delphine

Equipe Bois, LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

[matisse.chambry@umontpellier.fr](mailto:matisse.chambry@umontpellier.fr)

**Mots clefs :** bois ; hygromécanique ; retrait-gonflement ; anisotropie ; expérimentation ; simulation.

### **Contexte et objectifs**

Les bois sont des matériaux fortement hygroscopiques dont les propriétés mécaniques sont très étroitement liées à leur teneur en eau. Les couplages hygromécaniques font référence à l'interaction entre les phénomènes hydriques (d'adsorption et désorption de l'eau en phase vapeur ou même liquide) et les réponses mécaniques du bois sous sollicitations de déformations ou de contraintes. Ces couplages sont fondamentaux pour comprendre et prédire le comportement du bois dans des environnements variés, et particulièrement sous l'influence de changements d'environnement hydrique (Perré et al 2023, Mazzanti et al 2014, Alkadri et al 2020). Parmi les exemples que l'on peut citer, il est décisif de prédire ces couplages sur des pièces à support bois du patrimoine culturel (œuvres d'arts sculptées ou panneaux peints (Dupré et al 2020, Jullien et al 2023, Riparbelli et al 2023) tout comme ces phénomènes peuvent être prépondérants dans la construction bois, notamment au niveau des assemblages, lors de changements marqués de classes de service ou d'expositions météorologiques des bois utilisés en structures.

Le sujet de thèse présenté vise à caractériser le comportement hygromécanique des bois, particulièrement dans les directions transverses aux fibres, en se basant sur une approche expérimentale et sur la modélisation du phénomène de retrait/gonflement contraint du bois.

### **Matériel et méthodes**

Les caractérisations expérimentales se feront dans un premier temps à l'échelle de petits échantillons « parfaits » de l'ordre de quelques cm dans les directions transverses, sur deux essences « modèles » (peuplier et épicéa). Il s'agit de mettre au point et réaliser la mesure couplée de différents phénomènes en réponse à une variation d'humidité relative : diffusion/sorption, retrait/gonflement libre, et contrainte en réponse à un retrait/gonflement empêché.

Par la suite, des mesures seront faites à l'échelle de structures (poutres, panneaux peints, ruches...) de l'ordre de 1 à quelques dizaines de cm dans les directions transverses, afin de valider les lois de comportement identifiées sur les petits échantillons.

### **Résultats attendus**

Les résultats expérimentaux obtenus permettront d'établir :

- Des lois de comportement couplées se basant sur un petit nombre de paramètres en vue de permettre des simulations numériques utiles pour les applications visées dans le patrimoine culturel (particulièrement les panneaux peints) ou la construction bois (particulièrement dans les zones d'appuis assemblées mécaniquement).

- Un protocole de mesure des paramètres du comportement hygromécanique transverse, ouvrant des perspectives quant à l'étude de la diversité de ce comportement et de ses déterminants microstructuraux.

Ultérieurement, le modèle de comportement proposé sera implémenté dans un code d'éléments finis afin de confronter les simulations aux mesures expérimentales réalisées à l'échelle des structures.

L'approche développée dans ce projet doctoral permettra d'acquérir une meilleure compréhension du comportement hygromécanique des bois dans leur diversité d'usages réels et disposer d'un modèle prédictif des variations dimensionnelles de diverses structures en fonction du chargement hygrothermique subi.

## Références

Alkadri A, Jullien D, Arnould O, Rosenkrantz E, Langbour P, Hovasse L, Gril J (2020) Hygromechanical properties of grenadilla wood (*Dalbergia melanoxylon*). *Wood Science and Technology*, 54(5), 1269-1297. DOI 10.1007/s00226-020-01215-z

Dupré JC, Jullien D, Uzielli L, Hesser F, Riparbelli L, Gauvin C, Mazzanti P, Gril J, Tournillon G, Amoroso D, Massieux P, Stépanoff P, Bousvarou M (2020) Experimental study of the hygromechanical behaviour of a historic painting on wooden panel: devices and measurement techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 46 :165-175, DOI: 10.1016/j.culher.2020.09.003

Jullien D, Dupré JC, Gauvin C, Uzielli L, Hesser F, Riparbelli L, Mazzanti P, Gril J, Tournillon G, Amoroso D, Hazael Massieux P, Stepanoff P, Bousvarou M (2023) Hygromechanical behaviour of a 16th century painted wooden panel: in-situ experiments to quantify the mechanical effect of the frame and the cradle. *Journal of Cultural Heritage*, 64:266-274, DOI 10.1016/j.culher.2023.10.011

Mazzanti P, Colmars J, Gril J et al (2014) A hygro-mechanical analysis of poplar wood along the tangential direction by restrained swelling test. *Wood Sci Technol* 48, 673–687 <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0633-4>

Perré P, Rémond R, Almeida G, Augusto P, Turner I (2023) State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids: A review of 40 years of progress and perspectives, *Drying Technology*, DOI: 10.1080/07373937.2022.2159974

Riparbelli L, Dionisi-Vici P, Mazzanti P, Brémand F, Dupré JC, Fioravanti M, Giacomo G, Helfer T, Hesser F, Jullien D, Mandron P, Ravaud E, Togni M, Uzielli L, Badel E, Gril J (2023) Coupling numerical and experimental methods to characterise the mechanical behaviour of the Mona Lisa: a method to enhance the conservation of panel paintings, *Journal of Cultural Heritage*, 62:376-386, DOI 10.1016/j.culher.2023.06.013

## A study of the differences between the 8 mm and 6.3 mm fractions of sieved recovered wood

GALITEKIN Zeynep, IRLE Mark, LEBRETON Flore

École Supérieure du Bois, Nantes  
[galitekinzeynep@outlook.com](mailto:galitekinzeynep@outlook.com)

**Key words :** product types; recycling; MDF; secondary raw material

### Context and objectives

The continuous increase in MDF (Medium Density Fibreboard) production capacity on a global scale brings the annual total to 100 million m<sup>3</sup> (FAOSTAT 2024). As a consequence, it is estimated that about 55 million m<sup>3</sup> of MDF waste is generated every year as a result of MDF production in previous years. This situation has made it even more important to study the types of products included in the recovered wood collections. This study is a part of the EcoReFibre project, which is a European project launched in May 2022.

Recovered wood is chipped improve the storage and transport efficiency of recovered wood (Irle et al 2023). It is possible that the different wood products present will respond to chipping differently, i.e. plywood might produce bigger chips than particleboard. The aim of this study is, therefore, to compare the ratios of wood product types in the 8 mm and 6.3 mm fractions of recovered wood samples collected from various regions of France and Germany. This is important because the EcoReFibre study has based its result only on the 8 mm fraction, which is the largest fraction; could it be that different proportions of wood products are observed in the 6.3 mm fraction?

### Material and methods

The samples collected “class B”, i.e. non-hazardous and suitable for recycling to particleboard. The samples were sieved using 8 mm, 6.3 mm and 4 mm mesh sieves. The particles held on an 8 mm (65.1 kg) and 6.3 mm (2.9 kg) sieve were then manually separated into 5 fractions: pure fibreboards, coated fibreboards, other panels (POP = plywood, OSB and particleboard), solid wood and non-wood.

Fig. 2 shows quite clearly why the 8 mm fraction has been used because it consists of many fewer particles and so it is easier to sort into the 5 fractions described above.



Fig. 1 : Five fractions



Fig. 2 :150g in the sample with a size of 6.3 mm (left) and 8 mm (right)

## Results and discussion

Although there appears to be a slight difference in the proportion of fibreboard in the two fractions, the difference is actually statistically insignificant. Consequently, there is no benefit to the EcoReFibre project to analyse both the 8 and 6.3 mm fractions.

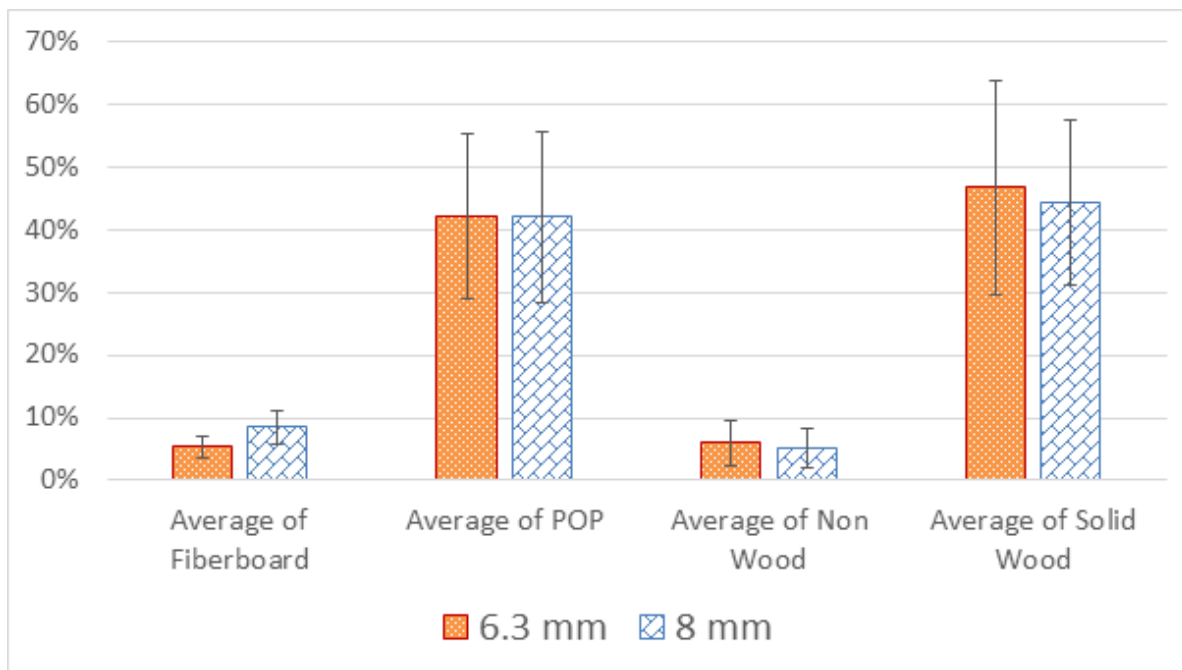


Fig. 3. Comparison between the 6.3 and 8 mm fractions of sieved Class B recovered wood.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the many people involved in the various wood recycling research projects. EcoReFibre project is funded by Horizon Europe (Call: HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01) from May 2022 to April 2026.

## References

FAOSTAT (2024) Forestry Production and Trade [WWW Document]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (accessed 6.18.24).

Irle M., Lebreton F, Lagarde H (2023) Wood recycling in the circular bioeconomy. *Pro Ligno* 19, 3–11.

## A study of the relative proportions of wood-based panels found in the POP fraction of recovered wood

SOLHAN Edanur, IRLE Mark, LEBRETON Flore

École Supérieure du Bois, Nantes

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

**Keywords :** recovered wood; POP fraction; categorize; recycling

### Context and objectives

The EcoReFibre project ([ecorefibre.eu](http://ecorefibre.eu)) offers ecological solutions and advocates sustainability by aiming to replace up to 25% of the raw fibres used in the production of new fibreboards with recycled fibres. This requires better knowledge of the contents of the wood waste stream. Consequently, many samples have been collected from waste facilities in different countries (Irle et al 2023). These samples contain mixed wood wastes and are sorted into four fractions: solid wood, POP, fibreboard and non-wood. The group called POP consists of the wood-based panels Particleboard, OSB, and Plywood. Knowing the types and proportions of wood-based materials that have been glued, painted, veneered, etc., is crucial for guiding future recycling options.

### Material and methods

As part of the EcoReFibre project, waste collection has been ongoing since July 2022, primarily in France and several other countries (Fig. 1). The samples collected for the project was sorted by hand divided into four categories: POP, non-wood materials, solid wood, and fibreboard. The POP fraction was divided into Particleboard pure, and Particleboard with coating, OSB, Plywood pure, Plywood with coating. The categorized wood-based pieces were weighed and measured (Fig. 2).

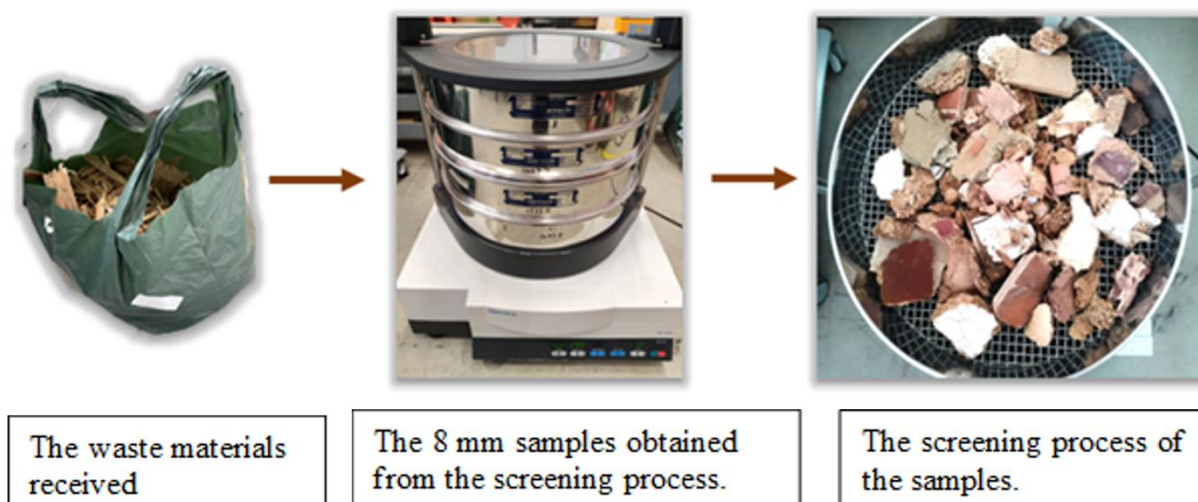


Fig. 1: Photographs of the main steps of sample preparation.

## Categorization of the POP fraction.

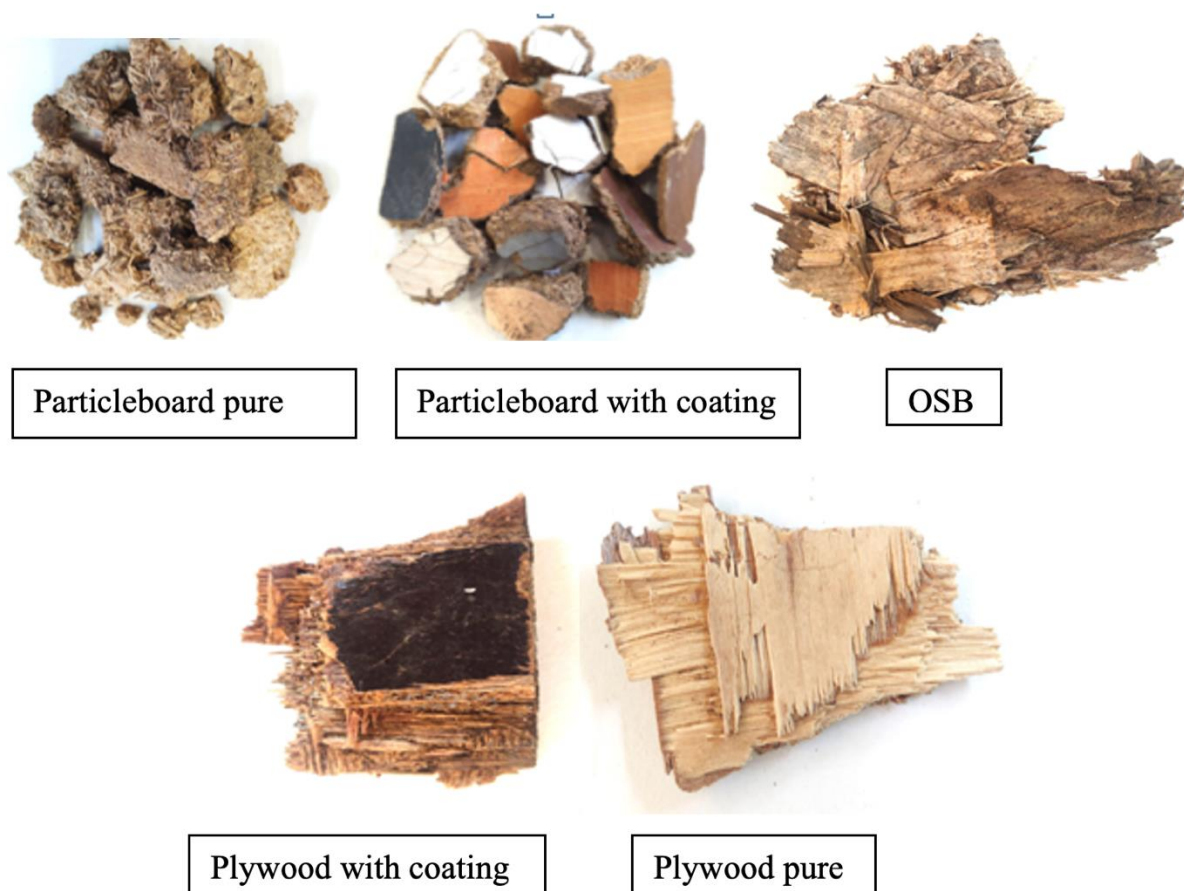


Fig. 2: Examples of the main types of wood-based panel found in the POP fraction

## Results

According to the data obtained in the study, the POP fractions of the incoming samples were found to contain 74% Particleboard, 3.8% OSB and 22.2% Plywood. Based on these results, it can be said that the most abundant material in the POP fractions is Particleboard. When categorized as coated and uncoated, the Particleboard coated ratio is 74.6%, and the uncoated ratio is 25.4%. For Plywood, the coated ratio is 31.5%, and the uncoated ratio is 67.5%.

The details will be included in the poster.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the many people involved in the various wood recycling research projects. EcoReFibre project is funded by Horizon Europe (Call: HORIZON-CL4-2021-RESILIENCE-01) from May 2022 to April 2026.

## References

Irle M, Lebreton F, Lagarde H, Buchner J, Belloncle C (2023) Initial results from the European project EcoReFibre on the presence of waste fibreboard in recovered wood streams. Presented at the International Panel Products Symposium, The BioComposites Centre, Llandudno, UK.



## **CONstruire en BOis avec les forêts de demain (CONBO): relations entre trajectoires de croissance et comportement mécanique des feuillus secondaires**

BAYLE Florian<sup>1</sup>, CLAIR Bruno<sup>2</sup>, LE ROY Robert<sup>3</sup>, HEURET Patrick<sup>4</sup>, MORIN Xavier<sup>5</sup>,  
SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal,  
Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>Université de Montpellier, CNRS, LMGC, Montpellier

<sup>3</sup>AMAP, Université de Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France

<sup>4</sup>Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris Malaquais, GSA, Paris

<sup>5</sup> Université de Montpellier, CNRS, CEFE, Montpellier

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

**Mots clés :** Bois ; Feuillus ; croissance ; qualité ; construction

### **Contexte et objectifs**

Les objectifs de décarbonation de la filière « Construction » fixés par la Règlementation Environnementale 2020 imposent des valeurs maximales d'indice Carbone qui vont devenir de plus en plus exigeantes jusqu'en 2031. Le but est d'orienter la construction vers des modes constructifs moins énergivores, notamment en augmentant l'utilisation du bois dans les produits de construction. Or il apparaît d'ores et déjà que la ressource française en bois d'œuvre résineux ne pourra pas répondre à cette demande (FCBA/BIPE 2019).

En France, les feuillus représentent 64 % du volume de bois sur pied, mais les prélèvements se concentrent principalement sur les résineux (IGN 2023), pour des raisons techniques de facilité de transformation et de conformations plus régulières. Depuis la période 2018-2022, face à l'ampleur de certaines crises comme celle des scolytes dans le Nord-Est, certains massifs présentent des niveaux de mortalité et de prélèvement supérieurs à la production biologique. Pour ces massifs, la forêt n'est alors plus un puits de carbone à l'heure actuelle.

Pour conserver le double levier du stockage de carbone dans les produits de construction comme dans les espaces boisés, il est nécessaire de diversifier les essences utilisées. Le stockage de carbone dans les produits de construction bois est particulièrement intéressant par la durée de mobilisation de la matière (a minima 50 ans) et par l'effet de substitution à des matériaux plus impactant comme le béton ou l'acier notamment. Néanmoins, sur les plans technique et réglementaire, les solutions à base de feuillus ne sont pas aujourd'hui compétitives. Les chênes représentent 44% du volume de bois sur pied des feuillus, et les hêtres composent également des peuplements importants comme espèce principale dans les hêtraies-sapinières notamment. Toutefois, les essences dites secondaires, ou d'accompagnement, représentent un volume non négligeable et sont sous-valorisées. Dans cette étude seront principalement visés le frêne, charme, peuplier, robinier, ainsi que les essences méditerranéennes susceptibles de voir leur aire de répartition se déplacer vers le Nord (IGN 2023).

### **Méthodologie proposée**

L'objectif du projet, et de la thèse associée, est de proposer aux concepteurs de structures en bois une base de données « matériau » plus fine, optimisant les classes de résistance selon la norme NF EN 338, et adaptée à la diversité des feuillus français. Dans une approche multi-

échelle, les spécificités mécaniques de chaque essence seront étudiées sous l'angle de leur origine physiologique, en intégrant les contraintes biomécaniques à chaque stade ontogénique liées au mode de sylviculture. Enfin, cette meilleure caractérisation de la ressource devra prouver son intérêt à travers des dimensionnements comparatifs d'ouvrages, afin d'évaluer la diminution d'écart de coût entre une solution actuelle, basée sur des résineux issus de plantations monospécifiques, et une solution optimisant la variété des bois, notamment issus de sylvicultures mixtes.

Les principaux verrous scientifiques identifiés sont :

- Etude du lien entre type de peuplement, modèle de croissance et qualité des bois par l'identification de grandeurs pilotes intrinsèques (ex : orthotropie, module spécifique) et de critères de qualité des sciages (ex : nodosité, pente de fil).
- Analyse mécanique des bois en vue d'une optimisation de la classification normative. En effet, la norme NF EN 338 définit les classes de résistance utilisables pour dimensionner les structures en bois. Résineux et feuillus ne rentrent pas dans les mêmes classes : les classes de feuillus présentent des masses volumiques plus élevées, et des ratios d'orthotropie longitudinal / transversal plus faibles tant en résistance qu'en rigidité. Les résultats du projet ANR EFEUR5 (Masson et al. 2019) montrent que les relations retenues dans la norme entre grandeurs mécaniques peuvent être affinées pour les feuillus.
- Réflexion sur des dimensionnements comparatifs et/ou alternatifs de structures bois permettant d'optimiser la diversité des espèces.

### **Résultats attendus**

Du plus spécialisé au plus généraliste :

- Adapter les modèles de croissances des arbres forestiers aux feuillus dits secondaires intéressants pour la construction, pour des trajectoires de croissance influencées par l'environnement (sécheresse, futaie régulière ou irrégulière, ...).
- Identifier des grandeurs mécaniques pilotes pour le matériau (module spécifique, orthotropie par exemple) ou pour les sciages (pente de fil par exemple) en lien avec les trajectoires de croissance.
- Justifier les écarts sur le dimensionnement des structures liés à une caractérisation mécanique plus fine des bois et des solutions constructives optimisant la diversité des essences

### **Remerciements**

Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI.

### **Références**

FCBA/BIPE (2019) Etude prospective : Evolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments – Fin. ADEME/France Bois Forêt/CODIFAB

IGN (2023) Inventaire Forestier National

Masson et al. (2019) Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5 Projet de Recherche Collaborative – Entreprise ANR-15-CE08-0027

## **Extractibles volatils des feuilles de sequoia sempervirens français, influence de la position dans la canopée**

LATORRE Loïc, MEHATS Jeremy, ROBLES Eduardo, CHARRIER Bertrand

IPREM – Université de Pau et des Pays de l'Adour, E25 UPPA, CNRS, IPREM,  
Mont de Marsan, France

[latorre@univ-pau.fr](mailto:latorre@univ-pau.fr)

**Mots clés :** sequoia sempervirens, terpènes, feuilles, extractibles, dominant, dominé

### **Introduction**

Dans le contexte de changement climatique et de la nécessaire rapide adaptation des forêts françaises, de nombreuses essences exotiques font l'objet d'essai d'acclimatation depuis bientôt 40 ans.

Essence utilisée comme arbre d'ornement pendant près de deux siècles, le sequoia à feuilles d'if s'avère être une essence forestière présentant de nombreux atouts. Originaire de la côte californienne et dernier représentant de son genre, le sequoia toujours vert fait l'objet d'une sélection clonale importante par les équipes de l'AFOCEL puis du FCBA depuis 1976. A cette occasion différents patrimoines génétiques et différents critères d'adaptation ont pu être sélectionnés en vue d'une adaptation aux différents climats de la France métropolitaine.

Des plantations expérimentales ont été effectuées dans le Sud-Ouest, en Bretagne mais aussi dans le Centre et sur le pourtour méditerranéen. Il s'avère que le sequoia est une essence bien plus plastique qu'initialement supposée tant en terme climatologique que pédologique et les accroissements dans les stations les plus favorables surpassent nettement les productions des essences plus traditionnelles (jusqu'à 50 m<sup>3</sup>/ha/an). Ces résultats ont été publiés par Hainry et Colombet (2019) ainsi que par Gourdin et Boissesson (2013 ; 2015)

La sylviculture du sequoia se doit d'être très dynamique. L'essence supporte facilement la concurrence et doit être plantée à forte densité (1250 tiges/ha) avec une première éclaircie au bout de 12 à 15 ans puis une éclaircie tous les 5 à 8 ans avec un âge d'exploitation final vers 40 ans. Rejetant facilement de souche et capable de supporter l'ombrage, les plantations de sequoia peuvent rapidement être traitées en futaie irrégulière.

De part sa production importante de biomasse, l'étude de la valorisation des différents compartiments de cet arbre, dont le bois, permettrait d'envisager de nouvelles perspectives de valorisation. C'est dans une perspective d'utilisation de *Sequoia sempervirens* en tant que nouvelle essence forestière ou en diversification de la production sylvicole que nous étudions les potentialités de cet arbre tout d'abord en analysant la composition chimique des feuilles avant de s'intéresser à l'analyse physico-chimique du bois.

### **Matériel et méthodes**

#### *Prélèvements*

Des feuilles de séquoia ont été prélevées durant 2 périodes (décembre 2023 – mars 2024 ; août 2024 – septembre 2024). Les prélèvements ont été faits sur des arbres de tailles et d'âge différent (rejet de souche et arbres dominants) sur 3 sites distincts (Montagut, Lâa-Mondrans et Arudy) situés dans les Pyrénées Atlantiques. Le site de Montagut (plantation : 1986) est issu de graines (origine USA) et de boutures (origine France), le site d'Arudy est issu de graines

(origine France, collectées sur un parc de 4 semenciers), le site de Lâa-Mondrans est issu d'un clonage. Les feuilles sont collectées sur des rameaux d'âge variable prélevés de manière à refléter la diversité des âges des feuilles sur chaque arbre. Les rameaux sont conservés dans des sacs hermétiques à -18°C avant l'analyse.

#### *Extraction*

Les feuilles sont séparées des rameaux puis broyées à l'aide d'un mixeur de cuisine jusqu'à obtenir des fragments de 2 à 5 mm. 3,0 g ( $\pm 0,1g$ ) sont mis à macérer dans 30 mL de cyclohexane dans un erlenmeyer bouché à température ambiante pendant 48h. L'ensemble est filtré par gravité sur papier Watman puis le solvant est évaporé à l'aide d'un évaporateur rotatif (température du bain : 30°C ; température du réfrigérant : 5°C ; pression : 150 mPa). L'extrait sec est ensuite dilué dans 3,0 mL de méthanol anhydre puis réparti dans 2 vials à chromatographie. Pour la quantification des monoterpènes, un étalon interne (isobutylbenzène) a été ajouté à la concentration de  $0,100 \pm 0,002mg \cdot mL^{-1}$ . Le TMAH est utilisé comme agent de méthylation et quelques gouttes de phénolphtaléine sont ajoutées comme indicateur de fin de réaction.

Les analyses ont été réalisées sur un appareil de chromatographie Perkin Elmer Clarus 590 équipé d'une colonne capillaire et couplé à un spectromètre de masse Perkin Elmer Clarus SQ8S. Le détecteur est équipé d'une source d'ionisation par impact électronique avec une énergie de 70 eV. Les conditions suivantes ont été mises en place :

- Injecteur : volume d'injection : 1  $\mu$ L, débit d'injection : 10 mL/min, gaz vecteur : hélium, température de l'injecteur : 300 °C
- Colonne : Elite-5MS longueur : 30 m, diamètre : 250  $\mu$ m, épaisseur de film : 0,25  $\mu$ m
- Four : rampe de 50 à 190 °C (8 °C/ min), de 190 à 300 °C (15 °C/ min) puis 300 °C / 10 min
- Spectromètre de masse : ligne de transfert : 200 °C, température de la source : 180 °C

Les analyses sont effectuées pour chaque période et pour chaque arbre en triplicat.

#### *Analyses statistiques*

Les analyses univariées (ANOVA) ont été établies avec l'outil intégré du logiciel libreoffice Calc ; les analyses multivariées (ACP) ont été faites à l'aide de bibliothèque panda et du logiciel python. Les représentations graphiques ont été obtenues avec jupyter notebook.

Les incertitudes ont été calculées à l'aide du logiciel libre GUMMC.

### **Résultats et discussion**

Peu d'analyses ont été effectuées sur les feuilles des séquoias à ce jour. Pour ce qui concerne la provenance américaine, Hall et Langenheim (1986) ont mis en évidence une très faible variabilité intra arbre mais une forte dépendance de la composition en monoterpènes vis à vis de la provenance géographique. Le séquoia étant une essence à faible dispersion des graines, on peut supposer une influence du génotype mais aussi des facteurs abiotiques. Des prélèvements sur des branches basses reflètent donc la composition de l'ensemble de l'arbre. Okamoto et al (1981) ont montré une forte variabilité saisonnière dans la composition en composés volatils des feuilles. Le Tab. 1 récapitule les compositions relatives moyennes mesurées sur des séquoia californiens.

Pour les séquoias cultivés dans le Sud-Ouest de la France, les monoterpènes que nous avons pu identifier sont moins divers et nous avons pu mettre en évidence une nette distinction entre les

arbres dominants et les individus dominés. Les résultats de nos analyses sont résumés dans le Tab. 2.

Tab. 1 : composition relative (% des monoterpènes totaux) des séquoias californiens

no	composé	Pourcentage moyen	C.V.
1	$\alpha$ thujène	0,1	0,19
2	$\alpha$ pinène	16,5	0,14
3	camphène	0,2	1,12
4	$\beta$ pinène	0,2	1,30
5	sabinène	27,6	0,07
6	myrcène	7,7	0,11
7	Limonène + $\beta$ phellandrène	27,4	0,07
8	Cis- $\beta$ -ocimène	0,1	0,65
9	$\gamma$ terpinène	15,7	0,13
10	P-cymène	1,8	0,54
11	terpinolène	2,9	0,18

Source : Hall and Langenheim (1986)

Tab. 2 : composition relative (% des monoterpènes totaux) des séquoias cultivés en France

no	composé	Arbre dominant (n=33)		Arbre dominé (n=31)	
		Pourcentage	variance	pourcentage	variance
1	$\alpha$ thujène	1,80	0,01	2,06	0,02
2	$\alpha$ pinène	37,66	0,31	31,78	0,55
3	sabinène	14,52	0,25	18,08	0,74
4	myrcène	6,26	0,09	7,32	0,04
5	Limonène + $\beta$ phellandrène	26,26	0,03	25,46	0,01
6	Cis- $\beta$ -ocimène	0,97	0,24	0,86	0,38
7	$\gamma$ terpinène	8,18	0,01	10,05	0,03
8	P-cymène	1,98	0,22	1,86	0,31
9	terpinolène	2,36	0,00	2,53	0,00
	Total monoterpènes	1,310		2,172	

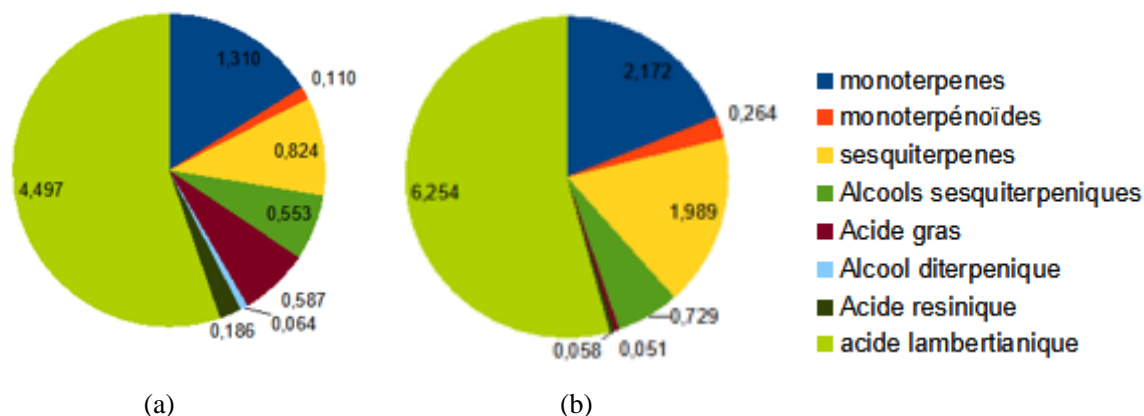
(total exprimé en mg/g de feuille sèche)

Nos analyses montrent que le séquoia pourrait être utilisé comme source de biomolécules pour l'industrie, cette essence pourrait être une alternative et/ou un complément au pin maritime. Ces mesures permettent d'envisager une valorisation des rémanents d'élagage ainsi qu'une exploitation des rejets de souches en fonction des molécules ciblées par l'utilisateur final.

Nous avons analysé toutes les molécules volatiles en GC-MS et nous avons pu identifier 55 molécules classées en fonction de leur type. La répartition de ces molécules (en pourcentage des extractibles totaux) pour les 2 étages est indiquée dans les Fig. 1a et 1b.

Le composé majoritairement extrait est un acide diterpénique de la famille des labdane, l'acide lambertianique. Cette molécule identifiée pour la première dans les aiguilles de pin à sucre (*Pinus lambertiana*) puis du pin de Corée (*Pinus koraiensis*). Lee et al (2016) ont pu démontrer que cette molécule a une activité antiobésité. Cette molécule présente en grande quantité dans les feuilles de séquoia (de 4 à 6 mg/g de feuille sèche) est aussi un antitumoral mais également un précurseur d'autres molécules dont les effets thérapeutiques sont avérés comme l'ont montré Tolstikova and al (2004) ainsi que Jeong et al (2017).

Le *Sequoia sempervirens* montre via ces premiers travaux sur les feuilles qu'il est une source naturelle de molécules d'intérêts industriels et pharmaceutiques. Cette source peut être facilement valorisée avec de faibles coûts d'extraction, et de part la production importante de biomasse de cette essence, elle pourrait être un apport pour l'industrie chimique européenne dans un contexte de forte concurrence internationale. Les analyses qui seront prochainement menées sur le bois compléteront cette première étape sur le potentiel de valorisation que peut apporter cette essence.



(a) (b)  
Fig. 1 : concentration moyenne des extractibles (en mg/g de feuille sèche) :  
(a) arbres dominants ; (b) arbres dominés

## Remerciements

Les auteurs remercient le FCBA pour son appui technique et le CRPF Nouvelle-Aquitaine pour son aide dans l'identification et le suivi des parcelles de séquoia.

## Références

- Lee MS, Lee SO, Kim SH, Lee EO, Lee HJ (2016) Anti-cancer effect of lambertianic acid by inhibiting the AR in LNCaP cells, *Int. J. Mol. Sci.*, 17(7), 1066; <https://doi.org/10.3390/ijms17071066>
- Jeong A, Kim JH, Lee HJ, Kim SH (2017) Reactive oxygen species dependent phosphorylation of the liver kinase B1/AMP activated protein kinase/ acetyl-CoA carboxylase signaling is critically involved in apoptotic effect of lambertianic acid in hepatocellular carcinoma cells. *Oncotarget*. Jul 26;8(41):70116-70129. doi: <https://10.18632/oncotarget.19592>. PMID: 29050265; PMCID: PMC5642540.
- Lee MS, Cho SM., Lee Mh et al. (2016) Ethanol extract of *Pinus koraiensis* leaves containing lambertianic acid exerts anti-obesity and hypolipidemic effects by activating adenosine monophosphate-activated protein kinase (AMPK). *BMC Complement Altern Med* 16, 51 <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1031-2>
- Tolstikova T, Sorokina I, Dolgikh M, Kharitonov Yu., Chernov S., Shul'ts É, Tolstikov G (2004) Neurotropic activity of lambertianic acid adducts with N-substituted maleinimides, *Pharmaceutical Chemistry Journal*, Vol 38, Issue 10, p532.
- Hainry D, Colombet M (2009) Bilan des introductions et perspectives d'utilisation du Séquoia toujours vert (*Sequoia sempervirens*) en Bretagne, CRPF Bretagne, 12 p. <http://www.crfp.fr/bretagne/pdfinformation/Sequoia%20toujours%20vert.pdf>
- Gourdin H, Fauconnier T (2015) Les séquoias, champions de la biomasse. La Forêt Privée, n°344.

de Boisseson J-M (2015) Quelques réussites d'espèces forestières introduites en Aquitaine, FCBA info.

Harvengt L, Bouvet A, de Boisseson J-M Berthelot A, Fauconnier T (2013) Le *Sequoia sempervirens* : un géant de la biomasse, FCBA info.

George D. Hall GD, Langenheim JH (1986) Within-Tree Spatial Variation in the Leaf Monoterpenes of *Sequoia sempervirens* Biochemical Systematics and Ecology, Vol. 14, No. 6, pp. 625-632.

Robert A. Okamoto, Barbara O. Ellison,' and Richard E. Kepner (1981) Volatile Terpenes in *Sequoia sempervirens* Foliage. Changes in Composition during Maturation J. Agric. Food chem. No. 29, pp. 324-326

## Fiber quality as measured by length and slenderness ratio of fibers adjacent to small vessels of *Acacia mangium*

YAHYA Ridwan<sup>1</sup>, YANSEN Yansen<sup>1</sup>, TAZURU-MIZUNO Suyako<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture, University of Bengkulu, Kota Bengkulu 38371.A, Indonesia

<sup>2</sup> Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

[ridwanyahya@unib.ac.id](mailto:ridwanyahya@unib.ac.id)

**Key words:** fiber length; slenderness ratio; small vessel; acacia mangium

### Context and objectives

Wood structure and anatomical characteristics are important considerations for pulp and paper quality (Pirralho et al 2014, Yahya et al 2017). The proportion of fiber is directly proportional to tear strength and folding endurance (Ona et al 2001). Fiber dimensions and their derivative values determine the quality of the paper produced (Dutt and Tyagi 2011). Thin-walled fibers, due to their wide lumens, will easily be bonded to other fibers, which consequently increases the strength of the paper produced (Tofanica et al 2011). Thin-walled fibers also improve the smoothness of the paper surface. The Runkel Ratio, coefficient of rigidity, Muhlstep ratio and flexibility coefficient determine the suitability of fiber for paper production (Yahya et al 2020).

*Acacia* shows diversity in fiber morphology. This diversity has been shown to vary between and within trees, and between provenances (Nugroho et al 2012). Diversity also occurs due to biomechanical factors among wood cells (Yahya et al 2020). The effect occurs due to cell enlargement i.e. extension or increase in cell diameter.

Vessel cells experience the greatest diameter increase in hardwoods such as *Acacia mangium* Willd. Radial diameter and wall thickness of fibers adjacent to large vessels (171–212 µm) in *A. mangium*, decreased from the first fiber to the fifth fiber, whereas the tangential diameter increased from the first fiber to the fifth fiber (Yahya et al 2015). The same tendency also occurred in the length of fibers adjacent to these vessels—fiber length decreased from the first fiber to the fifth fiber, with relatively constant fiber length after that (Yahya et al 2011).

Breeding programs in Indonesia are focused on improving pulping qualities of *Acacia* (Nirsatmanto et al 2015) and fiber properties such as fiber length, the Runkel ratio and slenderness ratio as useful indices for plus tree selection (Ohshima et al 2011), as with vessel proportion and size assessment (Amidon 1981). For *A. mangium*, where vessels comprise 10.4% (Yahya et al 2010), fibers near small vessels (85–109 µm) had better Runkel ratios, coefficient of rigidity values and Muhlstep ratios than that of large vessels (Yahya et al 2020), indicating that trees with a higher proportion of small vessels may be desirable in breeding for pulp and paper. For the present study, our objective was to determine the length and slenderness ratio of fibers close to small in *A. mangium*, in the context of pulpwood quality evaluation.

### Material and methods

A wood block of 10 mm × 5 mm × 20 mm (in radial, tangential and longitudinal directions) was cut from near the bark of a seven-year-old *A. mangium* tree. The tree was randomly selected from the trial area of a private forest plantation, Musi Hutan Persada (MHP) Company, in South



Sumatra, Indonesia. The sample was prepared following the method described in Yahya et al (2020) and given in brief below.

The wood block was first softened by autoclaving with alcohol and glycerol (1:1 ratio), serially sectioned into 200, 25  $\mu\text{m}$ -thick cross-sections that were then sequentially mounted on glass slides. Photographs were taken of the sections viewed through a confocal laser scanning microscope. The software Reconstruct (Fiala 2005) was applied to align, the serial section images and ImageJ software (National Institute of Health, USA) was used to examine the aligned images in 3D.

In this study, the length and radial diameters of 178 fibers adjacent to small vessels (lumen diameter 85–109  $\mu\text{m}$ ) were measured. Fiber length was obtained by multiplying section thickness (25  $\mu\text{m}$ ) with number of cross sections in which that fiber appeared. Slenderness ratio was calculated by dividing fiber length with fiber diameter.

Mann-Whitney and t-tests were used to compare length and slenderness ratio between fiber based on their distance from small vessels (recorded in the present study) and big vessels (reported in Yahya et al 2011).

## Results and discussion

### *Variation in fiber length*

Variation in the fiber length occurred as the distance from the vessel changed. Fig. 1 shows that in the radial direction, average fiber length increased from 700  $\mu\text{m}$  at the 1<sup>st</sup> fiber from the vessel to 1061  $\mu\text{m}$  for the 3<sup>rd</sup> fiber from the small vessel and then was relatively constant up to the 13<sup>th</sup> fiber from the vessel. For fibers adjacent to large vessels, average fiber length increased from 610  $\mu\text{m}$  at the 1<sup>st</sup> fiber from the vessel to 920  $\mu\text{m}$  for the 6<sup>th</sup> fiber from the vessel and then was relatively constant (1075  $\mu\text{m}$ ) up to the 10<sup>th</sup> fiber from the vessel (Yahya et al 2011).

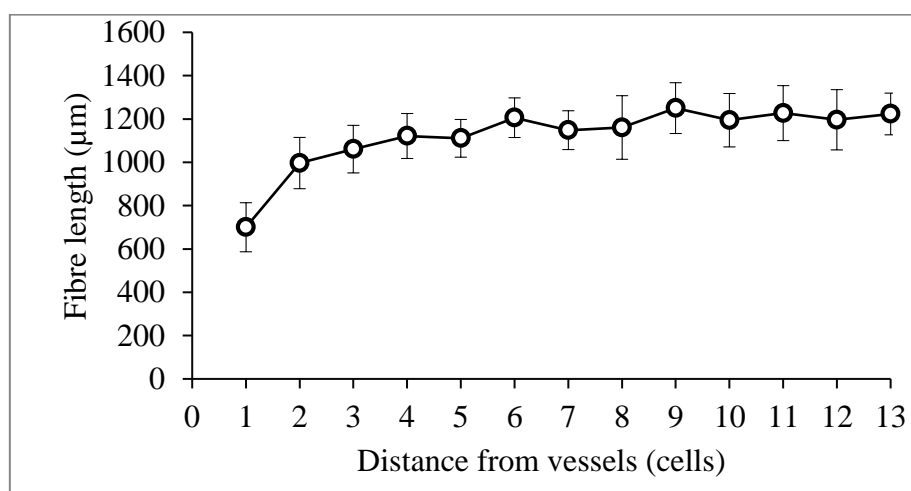


Fig. 1: Mean fiber length ( $\pm$  standard deviation) in relation to distance from small vessels of *Acacia mangium*

Fiber length of *A. mangium* near the pith was 1040  $\mu\text{m}$  up to 1080  $\mu\text{m}$  (Nurgoho et al 2012). We assume that most of the fibers measured in the study were distant from vessels. Fiber length in the previous study was relatively identical to the length of the fiber distant from the vessel in the present study.

We assume that the same fusiform initial or xylem mother cells in the cambial zone formed about two fibers in radial direction, and we hypothesize that the length of the fibers is affected

by vessel maturation. The processes that occur during differentiation determine fiber dimensions (Ridoutt and Sands 1993, Rao et al 2011). The state of maturation of other nearby xylem elements affects the final dimensions of wood fibers (Honjo et al 2006).

As the results of the previous research (Yahya et al 2011), vessel-adjacent fibers decreased in length in the present study. There are differences between fibers adjacent to vessels classified as small vessels (85–109  $\mu\text{m}$ ) in the present study, and fibers adjacent to vessels classified as large vessels (171 –212  $\mu\text{m}$ ) in the previous study. Fibers close to large vessels are shortened to the fifth fiber of the vessel (Yahya et al. 2011), while those close to small vessels were only up to the second fiber.

The Mann-Whitney and t-test results in Tab. 1 show that the average length of fibers adjacent to small vessels (859  $\mu\text{m}$ ) was significantly greater than the length of fibers adjacent to large vessels (642  $\mu\text{m}$ ). But there was no statistically significant difference in fiber length between those far from large vessels (1075  $\mu\text{m}$ ) and small vessels (1191  $\mu\text{m}$ ).

#### *Quality of fibers based on their distance from small and large vessels*

Fibers adjacent to both small vessels and large vessels were significantly shorter than fibers far from those vessels (Tab. 1). No difference in length was found for fibers that were far from both small and large vessels indicating that the pressure exerted on fibers by the vessels (both small and large), only affected adjacent fibers.

Tab. 1: Mean fiber length and slenderness ratio in relation to radial distance from small and large vessels of *Acacia mangium*

1.	Distance from vessel	Fiber length ( $\mu\text{m}$ )	Slenderness ratio
	5 fibers to large vessel <sup>1)</sup>	642**	33*
	6-10 fibers from large vessel <sup>1)</sup>	1075	54.8
2.	2 fibers to small vessel	859**	34**
	3-13 fibers from small vessel	1191	60
3.	5 fibers to large vessel <sup>1)</sup>	642**	33 <sup>ns</sup>
	2 fibers to small vessel	859	34
4.	6-10 fibers from large vessel <sup>1)</sup>	1075 <sup>ns</sup>	54.8 <sup>ns</sup>
	3-13 fibers from small vessel	1191	60

\*\* = significantly different at the 0.01 level; \* = at the 0.05 level; ns = non significant

<sup>1)</sup> Yahya et al (2011)

These results indicate that pressure from a large vessel resulted in the shortening of five fibers, which were shorter on average than the two fibers compressed by a small vessel. The average length of the first two fibers near a small vessel was 859  $\mu\text{m}$ , 28% shorter than that of the more distant fibers (1191  $\mu\text{m}$ ). For fibers adjacent to large vessels, which have a mean length of 642  $\mu\text{m}$ , 40% shorter than that of the more distant fibers (1075  $\mu\text{m}$ ) (Tab. 1), indicating that the reduction in length of fibers adjacent to small vessels was smaller than the reduction in length of fibers adjacent to large vessels. Therefore, the number of shortened fibers was correlated with vessel size and the length of those shortened fibers was negatively correlated with vessel size. Wood that contains longer fibers will produce stronger paper, because fiber length is positively correlated with burst strength and tensile strength (Pirralho et al 2014), tear strength (Kiaei et al 2014) and folding endurance (Ona et al 2001).

Variation in the slenderness ratio occurred as the distance from the vessel changed. Fig. 2 shows that in the radial direction, average slenderness ratio increased from 25 at the 1<sup>st</sup> fiber from the

vessel to 52 in the 3<sup>rd</sup> fiber from the small vessel and then was relatively constant up to the 13<sup>th</sup> fiber from the vessel.

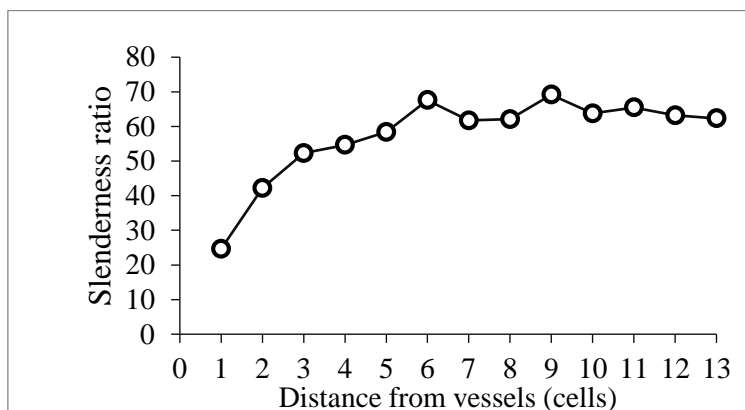


Fig. 2: Mean slenderness ratio in relation to distance from small vessels of *A. mangium*

Slenderness ratio of fibers distant from vessels in the present study was relatively the same as in the previous study. The average slenderness ratio of *A. mangium* was 54 (Jusoh et al 2014) and 51.29 (Yahya et al 2010).

The slenderness ratio of the two fibers adjacent to the small vessel was smaller than that for distant fibers, which was likewise for the five fibers adjacent to the large vessel was smaller than that for distant fibers (Tab. 1). There was no significant difference between fibers that were far from large and small vessels. Fibers adjacent to large and small vessels did not show significant differences in slenderness ratio values (Tab. 1).

Fiber length and slenderness ratio are directly proportional to the strength of the fiber (Shakhes et al 2011). Slenderness ratio determines the bonding ability of individual fibers (Omotoso and Owolabi 2015). Fibers with high slenderness ratio will greatly help fibers to collapse and inter-fiber bonding during the formation of paper. The stronger the inter-fiber bond between fibers, the higher the tensile strength, bursting strength and folding endurance of the paper produced.

The results of this research are consistent with those of our previous study that reported dimension and derivative values such as diameter, wall thickness, the Runkel Ratio, coefficient of rigidity, the Muhlstep ratio and flexibility coefficient values of fibers adjacent to small vessels were better as raw material for paper than fibers adjacent to large vessels (Yahya et al 2020). Wood that has a small diameter vessel is preferable for paper production (Takeuchi et al 2016). We thus recommend breeding *A. mangium* for smaller vessel size to produce good quality fiber as a raw material for the paper industry.

## Conclusions

Small vessels only cause two adjacent fibers to be shorter compared to fibers that are distant from the vessel. The two fibers adjacent to the small vessel are significantly longer than the five fibers adjacent to the large vessel. No statistical difference was found between the lengths of the fibers that were distant from large vessels and small vessels.

There are five fibers adjacent to a large vessel that have a smaller slenderness ratio value than those distant from the vessel, but only two fibers have a smaller slenderness ratio value if they are close to a small vessel. No statistical difference was found between the slenderness ratio value of the fiber both adjacent to large and small vessels, and those far from large and small vessels.

## Acknowledgements

This study was funded by the Ministry of Research, Technology and Higher Education, Indonesia.

## References

- Amidon TE (1981) Effect of the wood properties of hardwoods on kraft paper properties. *Tappi Journal* 64: 123–126.
- Dutt D, Tyagi CH (2011) Comparison of various eucalyptus species for their morphological, chemical, pulp and paper making characteristics. *Indian Journal of Chemical Technology* 18: 145–151.
- Fiala J (2005) Reconstruct: A free editor for serial section microscopy. *Journal of Microscopy* 218: 52–61. doi.org/10.1111/j.1365-2818.2005.01466.x
- Honjo K, Ogata Y, Fujita M (2006) Introduction and verification of a novel method for measuring wood fiber length using a single cross-section in *Acacia mangium*. *Trees* 20: 356–362. doi.org/10.1007/s00468-005-0048-9
- Jusoh I, Zaharin FA, Adam NS (2014) Wood quality of Acacia hybrid and second-generation *Acacia mangium*. *BioResources* 9: 150–160. https://doi.org/10.15376/biores.9.1.150-160
- Kiaei M, Mahdavi S, Kialashaki A, Nemati M, Samariha A, Saghafi A (2014) Chemical composition and morphological properties of canola plant and its potential application in pulp and paper industry. *Cellulose Chemistry and Technology* 48: 105–110.
- Nirsatmanto A, Setyaji T, Sunarti S, Kartikaningtyas D (2015) Genetic gain and projected increase in stand volume from two cycles breeding program of *Acacia mangium*. *Indonesian Journal of Forestry Research* 2: 71–79. https://doi.org/10.20886/ijfr.2015.2.2.71-79
- Nugroho WD, Marsoem SN, Yasue K, et al (2012) Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five different provenances in Indonesia. *Journal of Wood Science* 58: 185–194. doi.org/10.1007/s10086-011-1236-4
- Ohshima J, Yokota S, Yoshizawa N, Ona T (2011) Feasibility study of quality plantation pulpwood breeding on fibre length, vessel element length and their ratio sought by within-tree variations in Eucalyptus trees. *Forestry Studies* 54: 37–47. DOI: 10.2478/v10132-011-0094-6
- Omotoso A, Owolabi AW (2015) Pulp and paper evaluation of solid wastes from agricultural produce. *International Journal of Chemistry* 7: 113–121. URL: http://dx.doi.org/10.5539/ijc.v7n2p113
- Ona T, Sonoda T, Ito K et al (2001) Investigation of relationship between cell and pulp properties in Eucalyptus by examination of within-tree property variations. *Wood Science and Technology* 35: 363–375.
- Pirralho M, Flores D, Sousa VB, Quilhó T, Knapic S, Pereira H (2014) Evaluation on paper making potential of nine Eucalyptus species based on wood anatomical features. *Industrial Crops and Products* 54: 327–334. doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.040
- Rao KS, Kim JS, Kim YS (2011) Early changes in the radial walls of storied fusiform cambial cells during fiber differentiation. *IAWA Journal* 32: 333–340. doi.org/10.1163/22941932-90000061

- Ridoutt BG, Sands R (1993) Within-tree variation in cambial anatomy and xylem cell differentiation in *Eucalyptus globulus*. *Trees* 8: 18-22. doi.org/10.1007/BF00240977
- Shakhes J, Zeinaly F, Marandi MAB, Saghafi T (2011) The effect of processing variables on soda and soda-aq pulping of kenaf bast fiber. *Bioresources* 6: 4626-4639.
- Takeuchi R, Wahyudi I, Aiso H et al (2016) Wood properties related to pulp and paper quality in two Macaranga species naturally regenerated in secondary forests, Central Kalimantan, Indonesia. *Tropics* 25:107-115. DOI: 10.3759/tropics.MS15-23
- Tofanica BM, Cappelletto E, Gavrilesco D, Mueller K (2011) Properties of rapeseed (*Brassica napus*) stalks fibers. *Journal of Natural Fibers* 8: 241-262. DOI: 10.1080/15440478.2011.626189.
- Yahya R, Sundaryono A, Imai T, Sugiyama J (2015) Distance from vessels changes fiber morphology in *Acacia mangium*. *IAWA Journal* 36: 36-43. doi.org/10.1163/22941932-00000083
- Yahya R, Koze K, Sugiyama J (2011) Fiber length in relation to the distance from vessels and contact with rays in *Acacia mangium*. *IAWA Journal* 32: 341-350. doi.org/10.1163/22941932-90000062
- Yahya R, Sugiyama J, Silsia D, Gril J (2010) Some anatomical features of an *Acacia* hybrid, *A. mangium* and *A. auriculiformis* grown in Indonesia with regard to pulp yield and paper strength. *Journal of Tropical Forest Science* 22: 343-351.
- Yahya R, Yansen Y, Sundaryono A, Horikawa Y, Sugiyama J (2017) Neighborhood of vessels: Chemical composition and microfibril angle of fiber within *Acacia mangium*. *Journal of Tropical Forest Science* 29: 267-274. https://doi.org/10.26525/jtfs2017.29.3.267274
- Yahya R, Yansen Y, Tazuru-Mizuno S, Sugiyama J (2020) Effect of vessel diameter on variation of fiber morphology in *Acacia mangium*. *IAWA Journal* 41: 1-10. https://doi.org/10.1163/22941932-00002100

## A dynamic model for the cyclic behaviour of wood assemblies

GOMEZ Dalmer<sup>1</sup>, CUMUNEL Gwendal<sup>1</sup>, BORNERT Michel<sup>1</sup>, PEYRET Nicolas<sup>2</sup>,  
CATTEROU Thomas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Navier, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, CNRS, F-77455 Marne-la-Vallée, France

<sup>2</sup>Laboratoire Quartz, ISAE-Supmeca, 3 rue Fernand Hainaut, Saint-Ouen, 93400, France

<sup>3</sup>FCBA, Institut technologique du bois, Allée du Boutaut, Bordeaux, 33000, France

[dalmer.gomez@enpc.fr](mailto:dalmer.gomez@enpc.fr)

**Key words:** wood assembly, hysteresis, dynamic model

### Context

The whole vibration behaviour of a wooden building is partly governed by the assemblies. Non-linearity is a characteristic of rod-type connectors, this behaviour is thus transposed to the building. Among the rod-type assemblies, the dowel-type assembly allows connections with smooth rods with a metal plate fitting inserted into the wood. Energy dissipation is possible thanks to the plasticization of dowels and the wood in contact with the dowel.

The cyclic behavior of this type of assembly shows complex phenomena of degradation. The aim of this study is to propose a model for the dynamical behavior (cyclic behavior) of this type of assembly.

### Experimental results

The experimental results here presented (Sousseau 2022) are related on a control displacement test in accordance with the EN 12512 (2002) protocol (Fig. 1 right) on a three-dowel assembly.

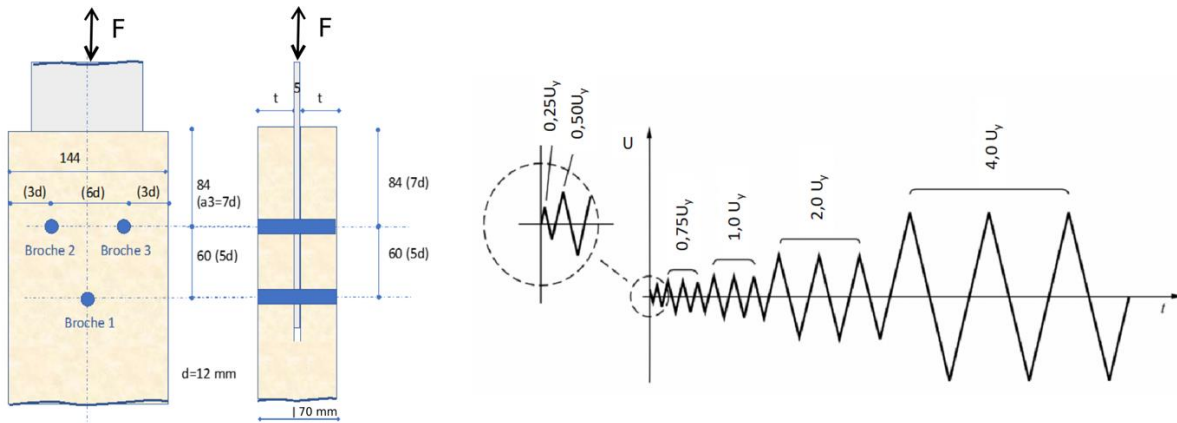


Fig. 1 : Sample dimensions (left) and loading protocol (right).

The result thus obtained, correspond to a cyclic curve going from a zero load to the failure limit (Fig. 2). From this curve, different parameters can be studied (ductility, energy dissipation, stiffness degradation, pinching, etc). This study is focused on modelling the phenomena in a differential formulation of the force displacement curve.

The 3D representation (Fig. 3) shows the evolution of force and displacement with the time. Because the test is made with a displacement control, the measured displacement does not correspond to the driving displacement and two different tests have always different level of deformation and loading responses.

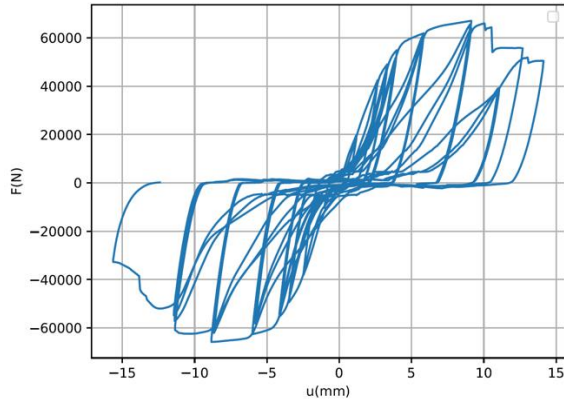


Fig. 2 : Force-displacement response

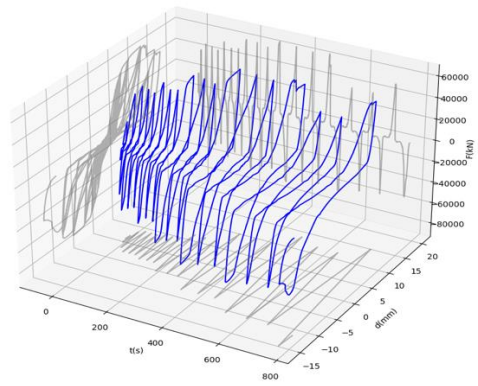


Fig. 3 : 3D representation

### Dynamic model

From the tests (Fig. 2), a non-linear response is observed, with residual energy dissipation. Since non linearities are present, differential formulation is needed. One of this type of model is the one proposed by Dahl (1968). This model is generally used for friction phenomena.

One of its current formulations has three parameters ( $F_c$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$  in equation 1) (Fig. 4). The parameter  $\alpha$  is for higher variations of the stiffness with the force (Fig. 5). This parameter is set as one (linear variation of the stiffness with the force).

$$\frac{df}{dx} = \sigma \left( 1 - \frac{F \operatorname{sgn}(\dot{x})}{F_c} \right) \alpha \quad (1)$$

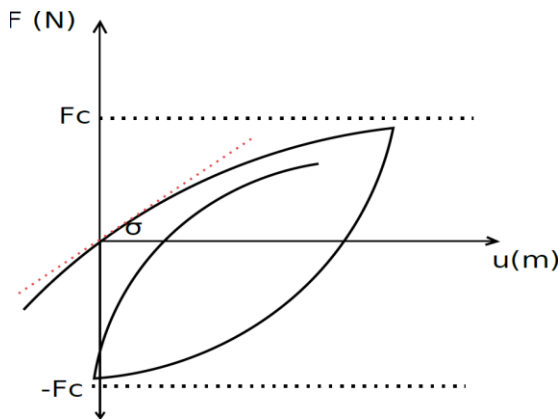


Fig. 4 : Dahl model parameters

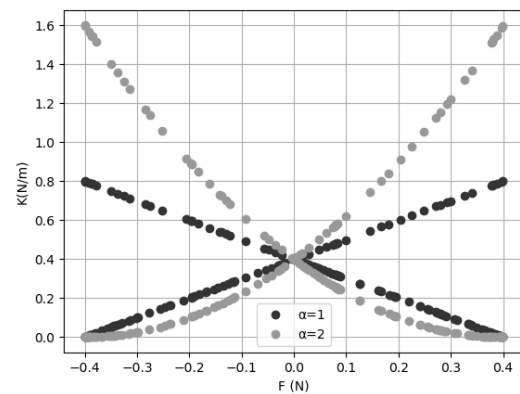


Fig. 5 : Dahl stiffness with the applied force

The equation (1) can be expressed as a differential according to the time by multiplying that formula by the speed ( $\dot{x}$ ). Similarly, the cyclic response of the assembly (Fig. 2) can be approximated by this kind of model, the stiffness shows a hardening phenomenon on loading and softening in the unloading (Fig. 5). The evolution of the stiffness with the force is nonlinear but can be separated in a loading and unloading path (Fig. 6).

Two nonlinear functions instead of four can be thus defined, since the cyclic behavior of the assembly can be considered symmetric in compression and tension.

$$\frac{df}{dx} = \sigma + \sigma \frac{F (\operatorname{sgn}(\dot{x}) + \operatorname{sgn}(x))}{2F_c1} + \sigma \frac{F (\operatorname{sgn}(x) - \operatorname{sgn}(\dot{x}))}{2F_c2} \quad (2)$$

The equation (2) takes into account two different stiffness to define the relation of the stiffness with the force, it is called the Dal model hereafter. Applying this model to the complete cyclic curve, leads to an underestimation of the assembly response and overestimation of the energy

dissipation (Fig. 7). This model can be appropriate for the ‘elastic’ zone and for a consolidated foundation of the assembly after ‘n’ cycles (Fig. 8).

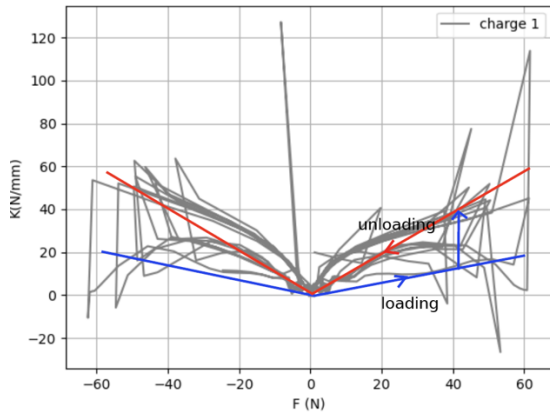


Fig. 6 : Stiffness with the force for a test

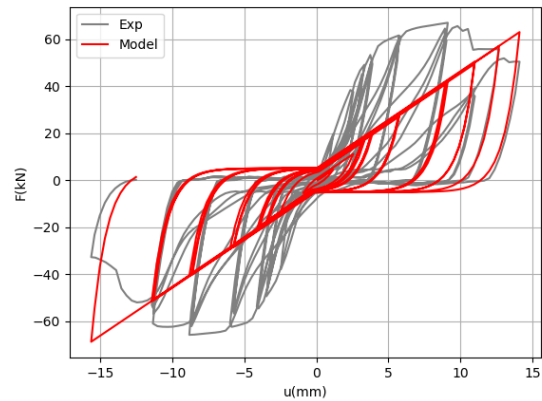


Fig. 7 : Optimisation of the complete curve

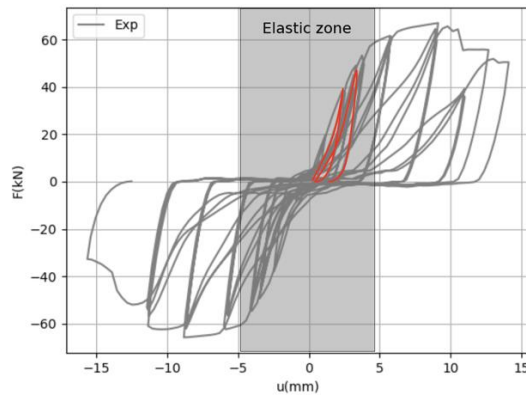


Fig. 8 : Domain to optimize the parameters of the dynamic model

In this domain, the model here proposed is optimised. To add a comparison, the BWBN model (Bouc 1967) is optimized for the same domain. This complex model with some modifications (Xu et al 2009) is defined by the following equations:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + akx(t) + (1 - \alpha)kz(t) = F(t) \quad (3)$$

$$\frac{df}{dx} = h(z) \left\{ \frac{1 - v(\beta \operatorname{sgn}(\dot{x})|z|^{n-1}z + \lambda z^n)}{\eta} \right\} \quad (4)$$

$$h(z) = 1 - \zeta_1 e^{-\frac{(z \operatorname{sgn}(\dot{x}) - qz_u)^2}{\zeta_2^2}} \quad (5)$$

where,  $k, \alpha, \zeta_1, \zeta_2, q, \beta, \eta, z_u, v, n$ ; are parameters of the model. This model has more than 9 parameters compared to the Dal model (three). However, this model includes phenomena like pinching and stiffness degradation.

## Results

Fig. 9 shows the force displacement response of the optimization for the two models. The general shape is obtained for both.

Fig. 10 shows the relation of the energy dissipation (surface inside the cycles) in function of time, this parameter is important in describing the hysterical dissipation of the model in order to describe the dissipation on the assembly for a given cyclic or dynamic loading.



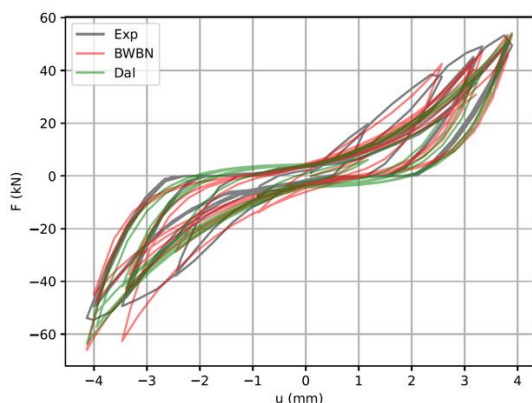


Fig. 9 : Force-displacement comparison

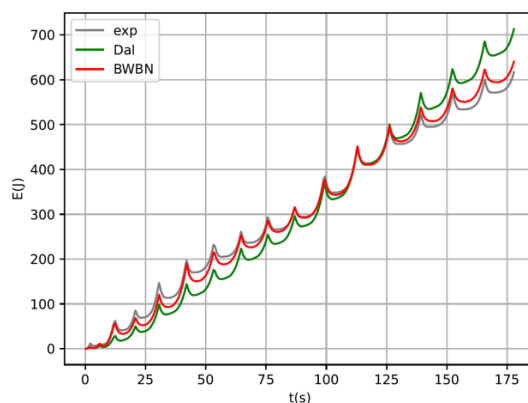


Fig. 10 : Energy dissipation comparison

## Conclusion

The cyclic behaviour of a dowel assembly shows a high non-linear response. Phenomena as stiffness and strength degradation appear. Pinching and energy dissipation are strongly present. To model this behaviour for a dynamic use, a differential model based on the Dahl model is proposed, this model is appropriate only for the ‘elastic’ domain of the assembly. A comparison of the model to the BWBN model shows good approximation in terms of force displacement response and in terms of energy dissipation. For further work, other parameters can be included to take into account other phenomena, despite an increased complexity.

## Acknowledgements

This work was carried out in the Navier laboratory at the Ecole des Ponts Paristech as part of the DynaTimberEyes project (AAPG 2021) funded by the National Research Agency (ANR).

## References

- Bouc R (1967) Forced vibrations of mechanical systems with hysteresis. Proc. of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillations, Prague.
- Dahl PR (1968) A solid friction model. The Aerospace Corporation, 18, 1-24.
- EN 12512 (2002) Méthodes d’essai – Essais cycliques d’assemblages réalisés par organes mécaniques, NF EN 12512.
- Sousseau Y (2022) Lois de similitude et modélisation du comportement mécanique des bâtiments bois multi-niveaux: apports, limites et prise en compte de l’incertain. PhD. Université de Bordeaux.
- Xu J, Dolan JD (2009) Development of nailed wood joint element in ABAQUS. Journal of Structural Engineering 135.8: 968-976.

## Développement et caractérisation de polyuréthanes isolants biosourcés pour le bâtiment durable

NGUMBE Bulingi-Bu, NGUYEN Dang Mao, EL GANAOUI Mohammed

Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, 186 rue de Lorraine, 54400 Cosnes-et-Romain, France

[dang.nguyen@univ-lorraine.fr](mailto:dang.nguyen@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs ;** Polyuréthane biosourcés ; microstructure ; hygrothermique ; bio-polyol ; isolant biosourcé

### Contexte et objectifs

Le polyuréthane (PU) conventionnel a plusieurs applications, il est utilisé comme matériau isolation, de literie, etc. Cependant, les monomères qui sont utilisés pour leurs fabrications sont des produits dérivés des ressources fossiles. Dans l'optique d'obtenir un matériau respectant les normes environnementales et de promouvoir les produits issus de la biomasse lignocellulosique nous avons développées des mousses de polyuréthane dérivées du polyol de bambou pour être utilisées comme matériaux poreux isolants. La cellulose nanocristalline (CNC) et le SiO<sub>2</sub> ont été utilisés pour améliorer les propriétés optimales du PU. Le but de cette étude a été de caractériser les propriétés microstructurales, notamment la porosité, la taille et la disposition des pores, la distribution de phase en 3D, d'analyser par nano-tomographie en combinant avec technique de traitement d'images de ces matériaux avec des méthodes préalablement optimisées (Bui et al 2024, Nguyen et al 2022). Les propriétés hygrothermiques, notamment la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'isotherme de sorption de ces matériaux, ont également été évaluées dans cette étude avec des paramètres optimisés (Nguyen et al 2020). La conductivité thermique a été évaluée en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée (GHP). La perméabilité à la vapeur d'eau a été déterminée par la méthode « coupelle » détailler dans la norme ISO 12572. La valeur de la capacité tampon hydrique a été évaluée sous le protocole Nordtest, évalue la capacité du matériau à faire migrer l'humidité environnante.

En conséquence, le Tab. 1 montre la composition en gramme des différents échantillons avec méthylène diphényle isocyanate (MDI), bio-polyol, SiO<sub>2</sub> ou CNC (Pham et al 2024, Nguyen-Ha et al 2023). Ces matériaux présentent une propriété hyper-poreuse avec une porosité allant jusqu'à 98.7 % ce qui est représenté dans le Tab. 2, avec une distribution uniforme des pores, ce qui permet d'expliquer leurs propriétés d'isolation thermique performante par rapport à la mousse PU conventionnelle. De plus, l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés hygrothermiques a également été étudiée pour évaluer leur applicabilité dans différents environnements.

Tab. 1 : Composition des échantillons

Echantillons	Polyol	B-polyol	MDI	SiO <sub>2</sub>	CNC
A1	0	100	250	0	0
A2	0	100	250	0	5
M1	30	70	250	0	0
M2	30	70	250	5	0

Tabl. 2 : La conductivité thermique à différents paliers d'humidité et la porosité des échantillons

Code	Porosité (%)	Conductivité thermique ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )		
		HR (33 %)	HR (50 %)	HR (75 %)
A1	98,71	0,032	0,032	0,033
A2	96,23	0,033	0,033	0,034
M1	96,85	0,035	0,036	0,036
M2	97,29	0,034	0,035	0,036

Le Tab. 3 donne les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau, ces valeurs sont comprises entre  $2,09 \cdot 10^{-11}$  et  $3,72 \cdot 10^{-11}$  Kg(m.s.Pa). Pour ce qui est de l'isotherme de sorption les résultats sont en cours d'élaboration et seront présentés ultérieurement.

En somme, cette étude a permis d'évaluer la structure et les propriétés hygrothermique des mousses polyuréthanes dérivés du polyol de bambou et renforcés avec le  $SiO_2$  et de la cellulose nanocristalline. Ces matériaux ont été fabriqués avec succès, sont respectueux de l'environnement et présentent un bon comportement hygrothermique.

Tab. 3 : Valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la résistance à la vapeur d'eau

Code	Perméabilité à la vapeur d'eau ( $\delta$ )	Résistance à la vapeur d'eau ( $\mu$ )
A1	$3,37 \cdot 10^{-11}$	6,164
A2	$3,72 \cdot 10^{-11}$	5,605
M1	$2,13 \cdot 10^{-11}$	9,895
M2	$2,09 \cdot 10^{-11}$	9,585

## Références

Bui QB, Bui TB, Nguyen NT, Le T, Ferreira da Silva Y, Perré P, Nguyen DM (2024) Assessing the combination of graphene and graphene oxide nanosheets in cement mortar and cement concrete, *Cement and Concrete Composites* 154, 105800.

Nguyen DM, Diep TMH, da Silva YF, Vu TN, Hoang D, Thuc CNH, Bui QB, Perré P (2022) Three-dimensional pore characterization of poly(lactic)acid/bamboo biodegradable panels, *International Journal of Biological Macromolecules*, 221 16-24. (Elsevier, IF 7.7).

Nguyen DM, Grillet A-C, Diep TMH, Bui Q-B, Woloszyn M (2020) Characterization of hygrothermal insulating biomaterials modified by inorganic adsorbents, *Heat and Mass Transfer*, 56, 2473-2485.

Pham LH, Nguyen NT, Nguyen DM, Nguyen TA, Nguyen TB, Suhr J, Nguyen TD, Rahim M, Tran-Le AD, Terrei L, Mehaddi R, da Silva YF, Perré P, Hoang D (2024) Effective non-halogen flame-retardants combined with  $nSiO_2$  particles to improve thermal stability and fire resistance of high-performance polyurethane nanocomposite foams, *Journal of Materials Science & Technology*, 203 1-13.

Nguyen-Ha TM, Nguyen TB, Nguyen TA, Pham LH, Nguyen DH, Nguyen DM, Hoang D, Oh E, Suhr J (2023) Novel high-performance sustainable polyurethane nanocomposite foams: Fire resistance, thermal stability, thermal conductivity, and mechanical properties, *Chemical Engineering Journal*, 474 145585.

## Valorisation de briquettes de bois obtenues à partir de déchets de bois de plusieurs essences du Gabon : analyse de cycle de vie et bilan énergétique.

ITOMBA BAYIKA Joël Eméric<sup>1</sup>, EKOMY ANGO Serge<sup>2</sup>, MANESCAU Brady<sup>3</sup>,  
MOUTOU PITTI Rostand<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université des Sciences et Techniques de Masuku, EPM, Franceville, Gabon

<sup>2</sup> Institution de Recherches Technologiques, CENAREST, Libreville, Gabon

<sup>3</sup> INSA Centre Val Loire, Univ. Orléans, PRISME EA 4229, Bourges, France

<sup>4</sup> Université Clermont-Auvergne, CNRS, SIGMA, Clermont, France

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

**Mots clés :** valorisation ; bois tropicaux ; briquettes ; connexes ; ACV ; bilan énergétique

### Contexte et objectif

Pour préserver la forêt gabonaise, le gouvernement interdit l'exportation des grumes et met en place une politique de transformation du bois à plus de 75 % sur le territoire national (Karsenty et al 2010). Cette politique a permis la multiplication des unités de production (Watremez et al 2023). L'industrialisation de ce secteur, consomme en majorité des énergies fossiles, responsables du réchauffement climatique. Ainsi, pour atteindre l'objectif zéro émission nette de CO<sub>2</sub> en 2050, il est essentiel de produire et de développer des ressources énergétiques (Monir et al 2022). Alors, il convient d'établir une chaîne de production à faible émission de carbone sur l'environnement. L'une des solutions prometteuses est la production de biocarburants à partir de déchets.

Benjamin (1997) a souligné qu'une manière de réduire l'empreinte carbone d'un site de production bois, consiste à valoriser les connexes. Ils peuvent diminuer les coûts de production et apporter aux ménages locaux un combustible propre. En valorisant ces déchets, il est possible de fabriquer des briquettes de bois. Le but de cette étude est d'apporter des solutions d'optimisation énergétique d'une usine de transformation du bois, en effectuant l'analyse de cycle de vie (ACV) d'un site et en caractérisant thermiquement de certaines essences de bois les plus usinés, au Gabon.

### Matériel et méthode

L'ACV a été réalisée sur le site industriel GBNS-Gabon, selon les normes ISO 14040 (2006) et 14044 (2006). Cependant, ce travail n'a pas pour vocation de remplir strictement tous les critères ISO, pour absence de certaines données de terrain. Le logiciel Simapro 9.6.0.1, Ecoinvent v3 et ReCipe 2016 End-point ont été utilisés. Le but est de montrer la pertinence de la valorisation des briquettes de bois. L'unité fonctionnelle (UF) est 1 m<sup>3</sup> de bois produit. Les chaînes de production sciage et contreplaqué sont les limites du système. Pour déterminer les propriétés de transport thermique des essences de bois, l'analyseur Hot Disk 2200 a été utilisé (Log et Gustafsson 1995, Gustavsson et al 2000, Adl-Zarrabi et al 2006, Hot-Disk 2024,). Les essences de bois qui ont été caractérisés sont : l'Okoumé, le Bilinga, le Movingui, l'Ozigo et le Niové issus de la forêt de la Ngounié, centre-sud du Gabon.

### Résultats et discussions

*Etude environnementale d'un site de production de bois*

Les résultats de l'inventaire montrent que l'électricité est l'unique flux d'énergie entrant utilisé pour l'automatisation des machines de l'unité de production de contreplaqué et de sciage. L'unité de contreplaqué consomme par jour en moyenne 136,5 kWh/UF. L'unité de sciage par contre consomme en moyenne 56,8 kWh/UF. L'énergie thermique utilisée pour le séchage du bois et au niveau des presses provient de la valorisation d'une certaine quantité de connexes de bois du complexe. Cependant, une certaine quantité de connexes de bois en excès est vendue aux petits commerçants locaux et l'autre incinérée à ciel ouvert sur le site.

Le Tab. 1 présente les résultats des dommages, sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources de l'unité de production de contreplaqué. Les dommages sur la santé humaine sont de 6,0E-04 DALY (Disability Adjusted Life Years ou AVCI Année de Vie Corrigée du facteur d'Invalidité). L'utilisation de la matière première (placage déroulé), la colle mélamine urée-formol (MUF), l'électricité, sont majoritairement responsables des dommages sur la santé humaine et le traitement de connexes de bois en excès par incinération présentait une contribution aux dommages sur la santé humaine à hauteur de 6,86 % pour 20 kg de déchets incinéré par jour (Tab. 2). La valeur des dommages sur les écosystèmes est de 1,11E-5 Species.yr (mesure du nombre de plantes vasculaires et d'organismes inférieurs, sur la terre et dans l'eau, qui devraient disparaître en raison des activités évaluées). L'utilisation de la matière première lignocellulosique est entièrement participative aux dommages sur les écosystèmes à hauteur de 89,71 % (Tab. 2). En effet, l'activité forestière participe à la disparition de certaines espèces et déséquilibre le milieu de vie d'autre pour leur évolution. Le traitement de connexes de bois en excès ne représentait que 0,34 % des dommages sur les écosystèmes (Tab. 2). En effet, la biomasse incinérée est une ressource renouvelable et le carbone émit participe à la croissance des nouveaux arbres, si et seulement si les forêts sont gérées de façon soutenable. La valeur des dommages sur les ressources vaut 13,66 USD2013 (U.S dollar reference year in 2013 ou ARDA Année de Reference du Dollar Américain en 2013). L'utilisation de l'électricité et de la MUF participe majoritaire à la disparition des ressources (Tab. 2). Ainsi, le traitement de connexes de bois par incinération au sein de l'unité de production de contreplaqué représente un point critique à optimiser pour ces dommages sur la santé humaine. La consommation accrue de l'énergie électrique est à optimiser pour son impact sur toutes les catégories dommages. L'utilisation de la MUF dans le processus de production de contreplaqué participe aux impacts sur la santé humaine, l'équilibre des écosystèmes et l'épuisement des ressources. L'optimisation de ce flux de matière entrant, commence par la mise au point des projets de recherche sur des résines biosourcées issue par exemple du bois, car la préférence de la MUF réside sur sa résistance à l'humidité. Cette caractéristique permet de produire du contreplaqué d'usage extérieur.

Tab. 1 : Impact de l'unité de production de contreplaqué sur les catégories dommages

<b>Santé humaine</b>	<b>Ecosystèmes</b>	<b>Ressources</b>
6,0E-04 DALY	1,11E -5 Species.yr	13,66 USD2013

Le Tab. 3 présente les résultats des dommages, sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources liés à la production de sciages. Les dommages sur la santé humaine sont de 2,8E-4 DALY. Les flux de matière (grumes) et d'énergie (électricité) participaient majoritairement aux dommages sur la santé humaine (Tab. 4). Le traitement de connexes de bois en excès par incinération contribuait aux dommages sur la santé humaine à hauteur de 21,86 % pour 30 kg de connexes de bois en excès incinérés par jour. La valeur des dommages sur les écosystèmes est de 9,90E-06 species.yr. L'utilisation des grumes est entièrement participative aux dommages sur les écosystèmes à hauteur de 97,43 % comme pour l'unité de production de

contreplaqué. En effet, l'activité forestière participe à la disparition de certaines espèces et déséquilibre le milieu de vie d'autre pour leur évolution. La valeur des dommages sur les ressources vaut 6,51 USD2013. Le flux de matière entrant (grumes), le flux d'énergie entrant (électricité) contribuaient majoritairement aux dommages sur les ressources. En effet, le faible rendement matière de la scierie (40-45%) augmente la pression sur les forêts, d'où les dommages liés à la consommation des grumes. Les dommages liés à l'utilisation de l'électricité proviennent de la consommation des carburants fossiles pour produire cette énergie, devant la forte demande mondiale. Par contre, le traitement de connexes de bois en excès par incinération participe à hauteur de 1,18 % (Tab. 4). Ainsi, le traitement par incinération des connexes de bois au sein de l'unité de production de sciages représente un point critique à optimiser pour ces dommages sur la santé humaine comme pour l'unité de production de contreplaqué. La consommation accrue de l'énergie électrique, est aussi à optimiser pour son impact sur toutes les catégories dommages.

Tab. 2 : Différents flux participants aux dommages sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources pour l'unité de production de contreplaqué

Catégories dommages	Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
<b>Flux entrants (%)</b>			
<b>Contreplaqué</b>	3,83	1,26	0
<b>Placages déroulés</b>	14,16	89,71	26,19
<b>MUF</b>	24,20	2,48	36,55
<b>Electricité</b>	45,92	4,02	34,46
<b>Chaleur issue de la chaudière à connexes de bois</b>	4,76	2,17	2,26
<b>Traitement des connexes de bois en excès</b>	6,86	0,34	0,38

Tab. 3 : Impact de l'usine de production de sciages sur les catégories dommages (End-points)

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
2,8E-4 DALY	9,90E-06 species.yr	6,51 USD2013

Tab. 4 : Différents flux entrants participant aux dommages sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources pour l'unité de production de sciages

Catégories dommages	Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
<b>Flux entrants (%)</b>			
<b>Sciages</b>	0	0	0
<b>Grumes</b>	36,45	97,43	67,67
<b>Electricité</b>	40,60	1,87	29,98
<b>Chaleur issue de la chaudière à connexes de bois</b>	0,90	0,12	0,26
<b>Traitement des connexes de bois en excès</b>	21,86	0,57	1,18

L'électricité et la matière première lignocellulosique sont les consommés d'entrée à optimiser ainsi que le traitement de déchets en excès pour répondre efficacement aux objectifs de l'étude.

L'utilisation de l'électricité a un fort impact, car le complexe est entièrement automatisé. Murphy et al (2015) indiquent que la majorité des émissions responsables des impacts environnementaux liées à la transformation du bois dans la scierie proviennent de la consommation d'électricité et l'intégration d'une usine de cogénération réduirait les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la production du bois en éliminant l'utilisation de l'électricité du réseau national. La valorisation des déchets en excès pour produire des biocarburants comme les briquettes de bois est une solution viable d'optimisation énergétique. Elle contribue à l'atténuation de la déforestation, des émissions des GES et à l'amélioration du rendement matière des usines au niveau national et sous-régionale. Cette valorisation améliora les dommages liés à l'utilisation de la matière lignocellulosique (diminuer la pression sur les forêts).

#### *Propriétés de transport thermique des essences bois sélectionnées*

Les résultats de la caractérisation thermique des essences de bois sélectionnées montrent que la température, l'humidité relative et la densité ont un impact important sur les propriétés de transport thermiques des essences de bois sélectionnées. Le Movingui a une conductivité thermique relativement élevée (0,3050 W/mk), ce qui indique ses capacités de transfert de chaleur efficaces. Cela pourrait être avantageux dans les procédés de production de biocarburants tels que la pyrolyse et la liquéfaction hydrothermale, qui nécessitent un chauffage rapide et uniforme (Cao et al 2017, Rao et al 2022). Le Niové a présenté la diffusivité thermique la plus élevée (0,9317 mm<sup>2</sup>/s) parmi les cinq essences de bois testées, suggérant une propagation rapide de la chaleur. Bien que sa conductivité thermique ne soit pas la plus élevée, sa capacité à distribuer rapidement la chaleur pourrait être utile dans les processus de production de biocarburants qui impliquent des réactions sensibles à la chaleur, comme la liquéfaction hydrothermale et la digestion anaérobie (Cao et al 2017 ; Gerber Van Doren et al 2017). L'Ozigo présentait une capacité thermique spécifique élevée (1656 J/kg/k), indiquant de bonnes capacités de stockage de chaleur. Ceci est avantageux dans les processus de production de biocarburants où le maintien de températures stables est important, car la capacité de stockage de chaleur plus élevée d'Ozigo par unité de volume peut supporter des instabilités de température tampon.

#### **Conclusion et perspectives**

Cette étude démontre que la valorisation de déchets en excès d'une chaîne de production de bois en biocarburants, présente des avantages environnementaux potentiels par rapport aux carburants d'origine fossiles. Elle permet d'atténuer l'impact lié à l'utilisation de l'électricité, d'améliorer le faible rendement matière, de réduire les émissions de GES et la déforestation.

Les résultats remarquables sur les caractéristiques thermiques des essences de bois testés renforcent la nécessité de valoriser les connexes du secteur bois dans le contexte spécifique de production de biocarburants liquide, solide et gazeux pour une transition énergétique durable.

Les perspectives de cette recherche sont de réaliser l'analyse thermogravimétrique (ATG) des essences bois étudiées, ensuite élaborer et caractériser les biquettes et mettre en évidence le potentiel environnemental du combustible avec l'outil ACV.

#### **Remerciements**

Nous remercions particulièrement la société GBNS-Gabon et le laboratoire PRISME de France pour avoir œuvré dans la réalisation de ce travail.

## Références

- Adl-Zarrabi B, Boström L, Wickström U (2006) Using the TPS method for determining the thermal properties of concrete and wood at elevated temperature *Fire and Materials*, 30(5), 359–369. 915.
- Benjamin W (1997) Biomass development and waste wood co-firing. *Energy conversion and management*, 38, S545-S549.
- Cao L, Zhang C, Chen H, Tsang DCW, Luo G, Zhang S, Chen J (2017) Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects. *Bioresource Technology*, 245, 1184–1193.
- Gerber Van Doren L, Posmanik R, Bicalho FA, Tester JW, Sills DL (2017) Prospects for energy recovery during hydrothermal and biological processing of waste biomass. *Bioresource Technology*, 225, 67–74.
- Gustavsson M, Gustavsson J, Gustafsson S, Hålldahl L (2000) Recent developments and applications of the hot disk thermal constants analyser for measuring thermal transport properties of solids. *High Temperatures-High Pressures*, 32(1), 47–51.
- Hot-Disk (2024) TPS Technology - Hot Disk.
- ISO 14040 (2006) Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, International Organization for Standardization.
- ISO 14044 (2006) Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices, International Organization for Standardization.
- Karsenty A, Sembres T, Randrianarison M (2010) Paiements pour services environnementaux et biodiversité dans les pays du Sud : le salut par la « déforestation évitée ». *Revue Tiers Monde* (2), 57-74.
- Log T, Gustafsson SE (1995) Transient Plane Source (TPS) Technique for Measuring Thermal Transport. *Properties of Building Materials*. *Fire and Materials*, 19(August 1994), 43–49.
- Monir MU, Abd Aziz A, Yousuf A (2022) Integrated technique to produce sustainable bioethanol from lignocellulosic biomass. *Materials Letters: X*, 13, 100127.
- Murphy F, Devlin G, McDonnell K (2015) Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. *Journal of Cleaner Production*, 92, 134-14.
- Rao YKSS, Dhanalakshmi CS, Vairavel DK, Surakasi R, Kaliappan S, Patil P, Socrates S, Lalvani JIJ (2022) Investigation on Forestry Wood Wastes: Pyrolysis and Thermal Characteristics of *Ficus religiosa* for Energy Recovery System. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–9.
- Gerber Van Doren L, Posmanik R, Bicalho FA, Tester JW, Sills D L (2017) Prospects for energy recovery during hydrothermal and biological processing of waste biomass. *Bioresource Technology*, 225, 67–74.
- Watremez E, Mouissi M, Herbaut C, Ndjila J, Bunduku C (2023) Impact du secteur bois sur l'économie du Gabon entre 2018 et 2023. EY & Mays Mouissi Consulting, Juin 2023, 164 pages. [https://www.mays-mouissi.com/wp-content/uploads/2023/08/EY-MMC-2023-06-20\\_Etude-dimpact-du-secteur-bois-sur-leconomie-du-Gabon-Vfinale.pdf](https://www.mays-mouissi.com/wp-content/uploads/2023/08/EY-MMC-2023-06-20_Etude-dimpact-du-secteur-bois-sur-leconomie-du-Gabon-Vfinale.pdf)



## **Formulation et caractérisation de résines phénoliques biosourcées et fonctionnalisées en vue de la production de revêtement et de matériaux poreux**

SENHAJI Youness, CHARRIER - EL BOUHTOURY Fatima

IPREM – Université de Pau et des Pays de l'Adour, E25 UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan, France  
youness.senhaji@univ-pau.fr

**Mots clés :** pin maritime, lignine, subérine, revêtement, fonctionnalisation.

### **Contexte et objectifs**

En raison de contraintes environnementales strictes, il existe une tendance croissante à promouvoir l'utilisation de résines phénoliques biosourcées au niveau industriel et donc à substituer les matières premières toxiques et non renouvelables que sont le phénol et le formaldéhyde par d'autres composés chimiques, d'origine naturelle, renouvelables et plus respectueux de l'environnement tel que la lignine. Cependant, même si ce résidu de l'industrie papetière représente une alternative de substitution du phénol, sa valorisation est relativement difficile. Cette difficulté est principalement due à sa structure complexe et variable, selon l'origine et le procédé d'extraction, ainsi qu'à la difficulté de surmonter plusieurs inconvénients tels que la forte polydispersité, la faible réactivité et la forte teneur en impuretés des échantillons de lignine obtenus. Ainsi, l'extraction, la purification, la caractérisation de la lignine dans le but d'uniformiser ses propriétés constitue un défi à relever.

Dans ce contexte l'objectif des travaux menés, est l'amélioration et l'optimisation d'une résine phénolique biosourcée, à base de lignine, en vue de l'utiliser en tant que revêtement pour la protection du bois contre l'humidité, l'augmentation de sa résistance au feu et de sa durabilité biologique. Il est donc important d'utiliser une lignine aux caractéristiques maîtrisées et ayant une réactivité intéressante.

Diverses techniques peuvent aider à surmonter les limitations d'utilisation de la lignine. Premièrement, la dépolymérisation peut faciliter sa fragmentation en composés plus réactifs et homogènes. Ainsi, cette technique peut permettre d'utiliser plus facilement ces composés dans le processus de synthèse. Deuxièmement, la fonctionnalisation chimique, en lui incorporant des groupes réactifs additionnels pour améliorer sa réactivité. Enfin, le couplage avec d'autres polymères, par greffage ou mélange, peut enrichir ses propriétés mécaniques et thermiques, ce qui rend cette substance plus appropriée pour l'utilisation dans l'industrie, y compris dans celle des produits de traitement du bois.

Comme point de départ, nous avons choisi de suivre deux démarches, pour améliorer les propriétés de la lignine. La première est la fonctionnalisation de la lignine pour la rendre plus réactive chimiquement. Les composés choisis pour ce faire sont à base de silicium et ils sont également susceptibles d'améliorer sa résistance au feu, puisqu'ils sont connus pour leur résistance au feu. La seconde consiste à réaliser le couplage de la lignine avec d'autres polymères apolaires, tels que la subérine, en visant le fait que la résine finale puisse apporter une résistance à l'humidité au bois qui sera traité.

## Matériel et méthodes

### Fonctionnalisation de la lignine Kraft

Nous avons utilisé de la lignine Kraft, fournie par l'entreprise UPM biochemicals (UPM Biopiva™), que nous avons fonctionnalisée en nous servant et testant trois types de composés à base de silicium (Fig. 1) :

- 3-aminopropyl (triéthoxysilane) (APTES)
- Tetraethyl orthosilicate (TEOS)
- 1-hexaméthylsiloxane (1-HMDS)

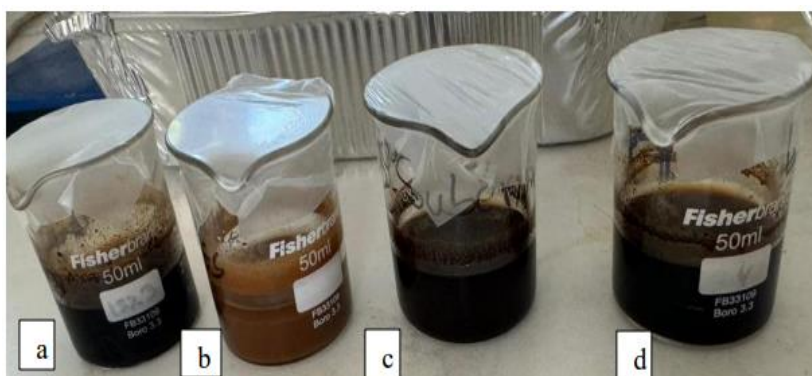


Fig. 1: Image représentative de lignine fonctionnalisée (silanisée) :  
(a) lignine seule ; (b) lignine-APTES ; (c) lignine-TEOS ; (d) lignine-1-HMDS

Ces additifs inorganiques vont permettre d'apporter une résistance au feu à la résine (de Hoyos Martinez et al 2021).

### Extraction de subérine à partir de liège

L'extraction de la subérine a été réalisée selon le protocole de Ferreira et al (2013), Fig. 2.

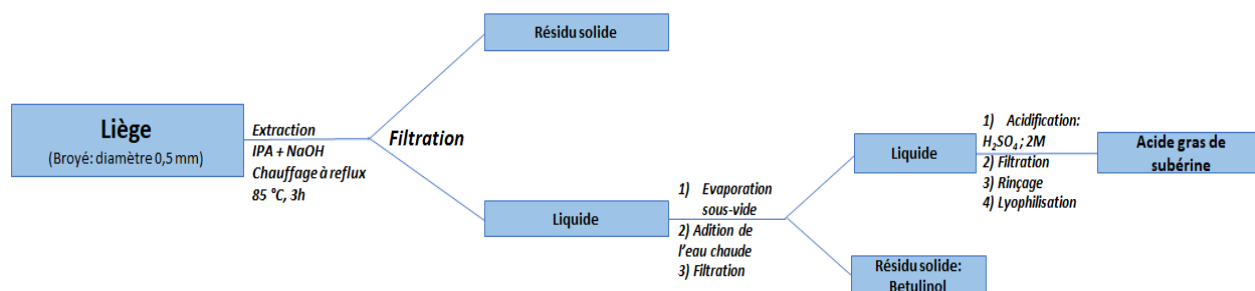


Fig. 2: Protocole d'extraction de subérine à partir de liège

*N.B* : Le liège que nous avons utilisé a été fourni par l'entreprise Agglo Lux (*liège de Landes*)

### Caractérisation par spectroscopie infrarouge (IR)

Le suivi des modifications a été effectué au moyen de la spectrométrie infrarouge, réalisée à l'aide d'un spectromètre infrarouge Jasco FT/IR-4700. Les mesures ont été effectuées en mode absorbance avec 64 balayages et une résolution de 4  $\text{cm}^{-1}$  de 4000 à 400  $\text{cm}^{-1}$ . Cette modification peut être prouvée par l'apparition dans le spectre infrarouge de nouvelles bandes caractéristiques des liaisons entre l'agent modifiant et la lignine. Cette technique a également été utilisée pour aider à caractériser les extraits de subérine.

### Formulation de la résine à base de la lignine fonctionnalisée et la subérine

Différentes formulations de résines ont été élaborées et le Tab. 1 indique la composition de ces dernières.

Tab. 1 : Composition chimique des quatre résines

Résine	Lignine	Subérine	APTES	TEOS	HMDSO
1	+	+			
2	+	+	+		
3	+	+		+	
4	+	+			+

## Résultats et discussions

### Résultats d'analyse infrarouge

Les résultats de la Fig. 4 représentent l'analyse IR de la lignine kraft fournie par UPM biochemicals. Sur le graphe A on observe un large pic vers  $3300\text{ cm}^{-1}$ , ce pic représente la vibration de groupe hydroxyle (OH), un autre pic à  $2900\text{ cm}^{-1}$  correspond à la vibration de liaison C-H, le pic à  $1700\text{ cm}^{-1}$  correspond au groupement carbonyle (C=O). Les autres graphes représentent l'analyse IR de lignine kraft silanisée par l'APTES, TEOS et HMDSO (graphes B, C et D successivement). D'après ces graphes, on peut voir clairement que l'intensité du pic correspond au groupe hydroxyle est diminué, cette diminution est peut-être expliquée par la réaction de groupe OH de lignine avec le groupe silane, l'intensité du pic qui correspond à la vibration de liaison C-H est augmentée en raison de l'introduction de nouvelle liaison C-H, ces changements d'intensité confirment la réussite de silanisation de la lignine.

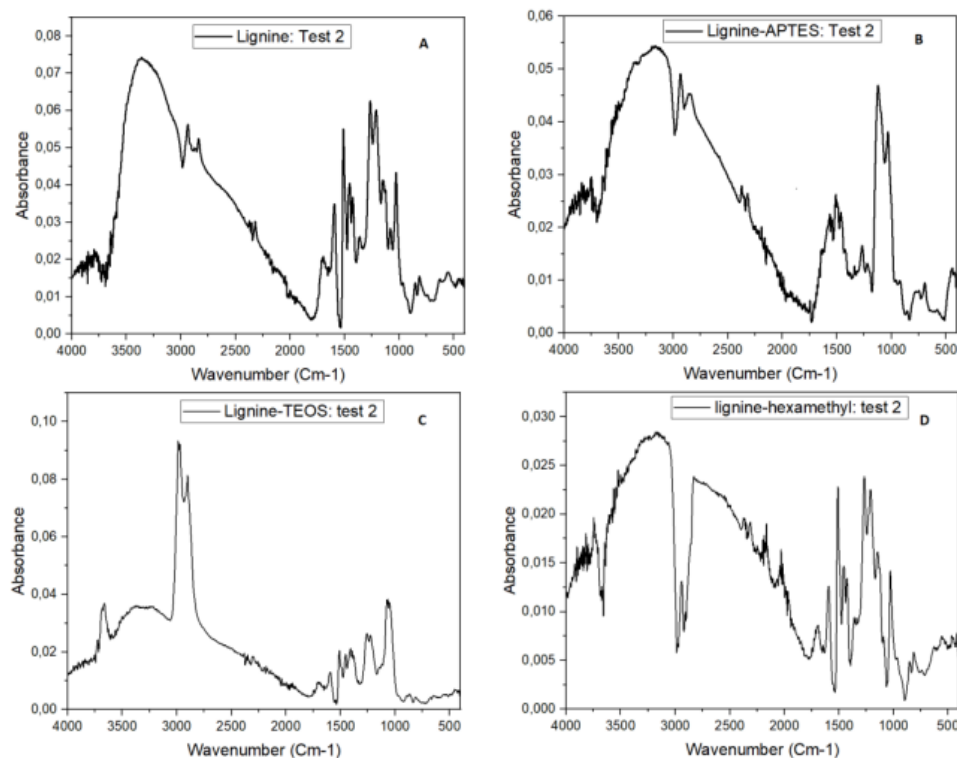


Fig. 4 : Résultat d'analyse infrarouge.

A- lignin seul, B- lignine + APTES, C- lignine + TEOS, D- lignine + HMDSO

### Caractérisation de la subérine

L'analyse par spectroscopie infrarouge (IR) des acides gras de la subérine permet d'identifier les différentes liaisons chimiques présentes dans la structure moléculaire de ces composés. D'après le graphe (Fig. 3) les pics caractéristiques sont :

- La bande autour de  $3300\text{ cm}^{-1}$  indiquant la présence de groupes hydroxyles, souvent en liaison hydrogène.
- Les deux bandes fortes près de  $2918$  et  $2850\text{ cm}^{-1}$  sont typiques des élongations C-H des méthylènes ( $\text{CH}_2$ ) dans les chaînes aliphatiques longues.
- Une bande distincte près de  $1735\text{ cm}^{-1}$  est indicative des liaisons ester C=O, ce qui est cohérent avec les esters formés dans la structure polymérique de la subérine.
- Une bande autour de  $1460\text{ cm}^{-1}$ , est due à la déformation de la liaison C-H dans les groupes méthylène et méthyle.

Ce résultat est conforme à celui obtenu par plusieurs travaux dont celui de Kumar et al. (2022).

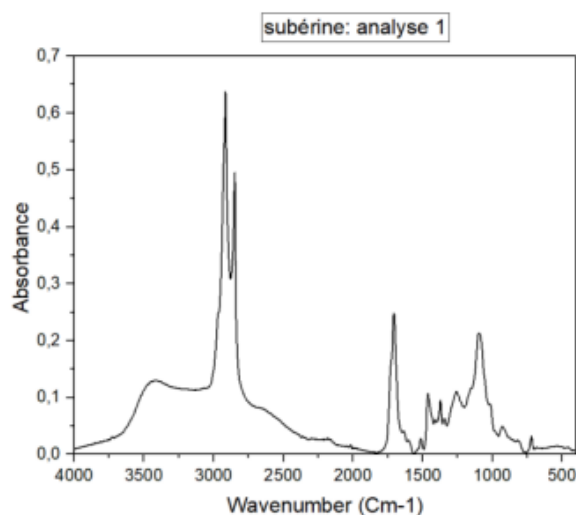


Fig. 5 : Analyse IR du produit extrait à partir de liège

### Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'obtenir une lignine fonctionnalisée, de réaliser une extraction réussie de la subérine et d'élaborer des résines. Ces dernières ont été appliquées sur le bois en utilisant la technique du deep-coating et les tests de résistances sont en cours et font partie des travaux futurs à mener (Fig. 6).

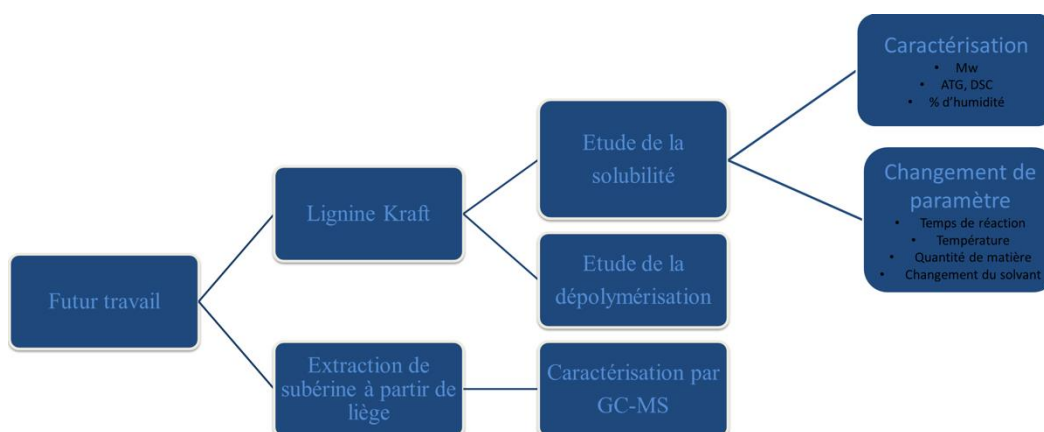


Fig. 6 : Plan du prochain travail

## Remerciements

Les auteurs remercient le soutien financier du Conseil départemental des Landes (CD40).

## Références

De Hoyos-Martínez PL, Issaoui H, Herrera R, Labidi J, Charrier-El Bouhtoury F (2021) Wood Fireproofing Coatings Based on Biobased Phenolic Resins, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9 (4), 1729–1740.

Ferreiraa R, Garciaa H, Andreia F, Carmen F, Armando.S, Luís Pa, Silva P.C(2013) Isolation of suberin from birch outer bark and cork using ionic liquids: A new source of macromonomers, *Industrial Crops & Products*, 44: 520-527.

Anuj K, Risto K, Veikko M, Erkki V (2022) Suberin Fatty Acid Hydrolysates from Outer Birch Bark for Hydrophobic Coating on Aspen Wood Surface, *polymers*, 14 (4): 832.

## Élaboration de nouveaux papiers semi-conducteurs par des procédés de chimie douce pour l'électronique organique

ABBASSI Hamza<sup>1</sup>, SABER Elhoussaine<sup>1</sup>, VILLANDIER Nicolas<sup>1</sup>, FOURATI Najla<sup>2</sup>, ZERROUKI Chouki<sup>2</sup>, ZERROUKI Rachida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Agroressources, Biomolécules et Chimie pour l'Innovation en Santé (LABCiS), UR 22722, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 123 avenue Albert Thomas, 87000 Limoges, France

<sup>2</sup> Laboratoire Systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie (Satie), UMR 8029, CNRS, Cnam, 292 rue Saint-Martin, 7503 Paris,

[hamza.abbassi@unilim.fr](mailto:hamza.abbassi@unilim.fr)

**Mots clefs :** Semi-conducteurs organiques ; Polyimines ; Pâte Kraft ; Chimie verte

### Introduction

Les semi-conducteurs sont les briques élémentaires des composants électroniques présents dans la quasi-totalité des appareils de la vie courante. La pandémie mondiale que nous avons traversée a ralenti leur production et en même temps a accentué la demande de matériels informatiques pour le travail à distance, comme pour le divertissement. Les demandes en semi-conducteurs ont explosé entraînant une pénurie qui a révélé au grand jour la dépendance des pays occidentaux vis-à-vis de l'Asie (Le marché des semi-conducteurs en 2024, s. d.). L'Europe a donc intégré la course technologique pour les semi-conducteurs du futur et souhaite acquérir une certaine autonomie en doublant la capacité des usines de l'Union européenne d'ici à 2030.

Dans cette course, les semi-conducteurs organiques occupent désormais une place non négligeable, et ont montré qu'ils pouvaient être des substituts au silicium.

L'électronique organique offre deux avantages majeurs par rapport à l'électronique à base de silicium : *i*) elle permet de concevoir des dispositifs sur substrats souples offrant ainsi un large éventail de nouvelles applications exigeant une flexibilité des supports (cellules solaires organiques, capteurs...); *ii*) elle présente un rapport performance/coût favorable, rendant l'option organique très intéressante, expliquant et incitant les recherches soutenues de nouveaux matériaux à propriétés électriques remarquables (Shaw et Seidler 2001).

L'essor de l'électronique organique soulève néanmoins des problématiques d'ordre écologique, pas seulement pour les polymères semiconducteurs eux-mêmes, mais aussi à cause des matériaux utilisés en tant que support, non recyclables, non biodégradables ou bien issus de sources non renouvelables (plastique ou verre). L'utilisation des éco-matériaux, produits biodégradables ou issus de ressources renouvelables, comme support pour les dispositifs d'électronique organique constitue de ce fait un enjeu majeur, aussi bien sociétal qu'économique (Eder et al 2004).

Les travaux du LABCiS s'inscrivent dans une nouvelle perspective durable orientée d'une part vers la synthèse de nouvelles molécules organiques semi-conductrices, des polyimines, en utilisant des réactions simples respectueuses de l'environnement et en éliminant l'utilisation et la génération de substances dangereuses et/ou nocives pour l'environnement, et d'autre part vers l'utilisation d'éco-matériaux, produits biodégradables issus de ressources renouvelables, comme support pour les dispositifs d'électronique organique.



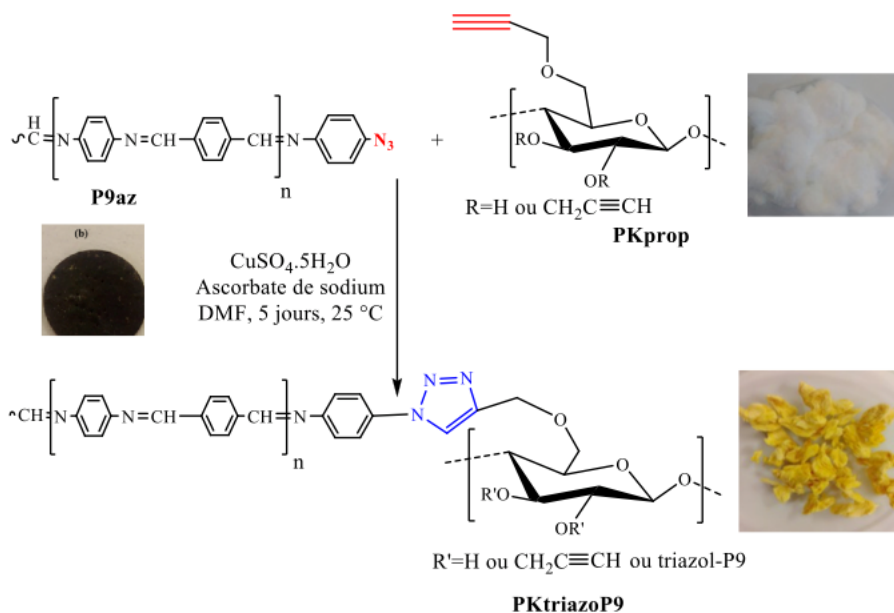


Fig. 2 : Greffage du polymère par click chemistry.

De manière à éviter la modification du polymère avant le greffage, ce dernier a aussi été effectué par amidation (Fig. 3). Pour ce faire, la pâte à papier a été préalablement oxydée par un système catalytique (**PKox**) et le couplage a ensuite été réalisé en présence d'un coupleur peptidique (Kuramae et al 2014) et le matériau après dopage a montré une conductivité de  $2,93 \times 10^{-6}$  S/cm. La fonctionnalisation de la pâte kraft a été confirmée par spectroscopie infrarouge et par analyse élémentaire.

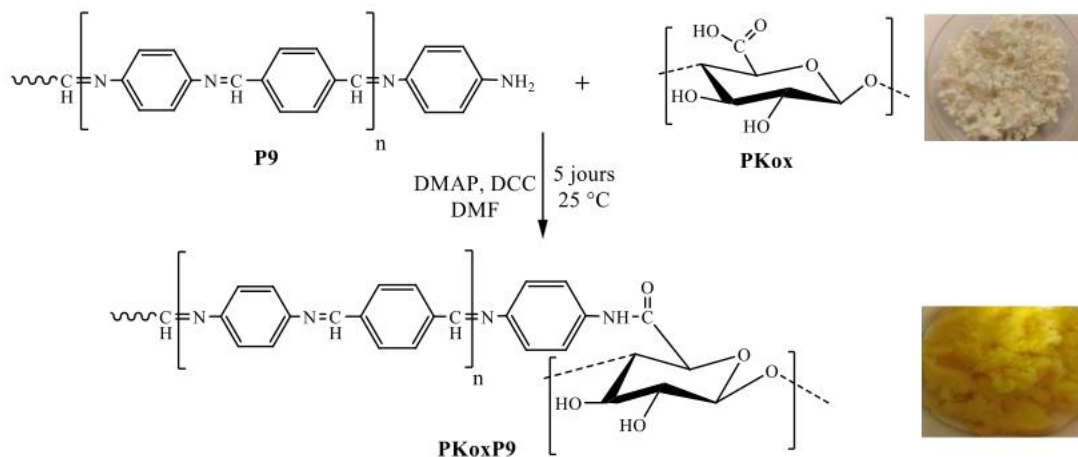


Fig. 3 : Greffage du polymère par amidation.

### Conclusion et perspectives

Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour une électronique peu coûteuse et écologiquement durable. Pour renforcer l'impact environnemental de nos matériaux, nous travaillons actuellement sur la synthèse de polyimines à partir de monomères biosourcés. Ces recherches constituent une percée dans le domaine des matériaux polymères pour de futures applications dans l'électronique organique flexible.



## Références

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. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2044-2056>

Eder F., Klauk H, Halik M, Zschieschang U, Schmid G, Dehm C (2004) Organic electronics on paper. *Applied Physics Letters*, 84(14), 2673-2675. <https://doi.org/10.1063/1.1690870>

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 & Engineering Chemistry Research*, 53(18), 7604-7610. <https://doi.org/10.1021/ie500555g>

Jihane I (s. d.) Synthèse de nouveaux polymères pour l'élaboration d'un papier semi-conducteur.

Kuramae R, Saito T, Isogai A (2014) TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils prepared from various plant holocelluloses. *Reactive and Functional Polymers*, 85, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.06.011>.

Le marché des semi-conducteurs en 2024 : Chiffres, stratégie. (s. d.). Consulté 27 septembre 2024, à l'adresse <https://www.etudes-et-analyses.com/blog/decryptage-economique/marche-semi-conducteurs-18-09-2024.html>.

Shaw JM, Seidler PF (2001) Organic electronics: Introduction. *IBM Journal of Research and Development*, 45(1), 3-9. *IBM Journal of Research and Development*. <https://doi.org/10.1147/rd.451.0003>

## Étude phytochimique, caractérisation GC-MS et évaluation de l'activité antioxydante des extraits de *Letestua durissima*.

ELLA NKOOGO Ley-Fleury<sup>1</sup>, DUMARÇAY Stéphane<sup>1</sup>, EDOU ENGONGA Prosper<sup>2</sup>,  
GERARDIN Philippe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Lorraine, INRAE, EA 4370 USC 1445 LERMAB, Faculty of Sciences and Technologies, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>2</sup>Normal Superior School, Department of Physical Sciences, LAPLUS Multidisciplinary Science Laboratory, Hight School Avenue, B.P. 17009, Libreville, Gabon

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

**Mots clés :** antioxydant ; caractérisation ; polyphénols ; extrait ; *Letestua durissima* ; valorisation.

### Contexte et objectifs

Le Gabon est un pays riche en ressources forestières, avec environ 85 % de son territoire couvert de forêts tropicales. Ces forêts sont principalement composées d'essences de bois durs tropicaux, qui sont très prisées sur les marchés nationaux et internationaux en raison de leur qualité et de leur durabilité. Selon la norme européenne EN 350, qui classe la durabilité naturelle des bois, certaines essences, comme l'Azobé ou l'Okan, présentent une résistance élevée à la décomposition. La valorisation des bois tropicaux est devenue un enjeu majeur pour le Gabon. La valorisation consiste à transformer les produits forestiers bruts en produits finis à forte valeur ajoutée, afin de maximiser les retombées économiques et environnementales pour le pays. Le Gabon a mis en place plusieurs initiatives pour valoriser ses ressources forestières, notamment à travers la promotion de l'industrie du bois innovante qui valorise pleinement une forêt gérée de manière durable et l'encouragement de la transformation locale des produits forestiers. Une perspective prometteuse consisterait à exploiter les substances extractibles présentes dans les essences de bois à haute durabilité naturelle, telles que *Letestua durissima*, qui est utilisée dans la médecine traditionnelle pour ses propriétés médicinales (Mouele al, 2022), afin de découvrir de nouvelles molécules. La valorisation des sous-produits issus de la première transformation du bois revêt ainsi une importance cruciale pour accroître la rentabilité de la chaîne de transformation du bois, en permettant la mise en place de nouvelles applications innovantes.

### Méthodes

L'échantillonnage a été réalisé au Gabon dans la province du Woleu-Ntem. Les différentes parties (écorce, aubier et bois de cœur) de *Letestua durissima* ont été collectées à l'aide d'une machette et d'une tronçonneuse (08/04/2021).

#### *Extraction*

Pour les extractions au Soxhlet, environ 7 g des différentes sciures (granulométrie 0,16 mm) préalablement séchées à 70°C dans une étuve pendant 24 heures ont été soumis à un cycle d'extraction successive avec des solvants de polarité croissante : cyclohexane, dichlorométhane, acétone, toluène/éthanol et eau (la durée d'extraction par solvant est de 24 heures).

#### *Screening phytochimique*

Les réactifs utilisés pour effectuer le screening phytochimique des extraits ont été préparés et utilisés selon les protocoles décrits par Houghton et Raman (1998), Akinjogunla et al (2010) et Badiaga (2011). Tous les différents tests ont été effectués en triplicat.

#### *Dosage des polyphénols totaux*

La méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu décrite par Wooton-Beart et al (2011) a été utilisée pour le dosage en phénols totaux de nos extraits.

#### *Dosage des tanins condensés*

La technique d'acide/butanol décrite par Chamorro et al. (2012) a été utilisée pour évaluer les tanins condensés contenus dans les extractibles.

#### *Dosage des flavonoïdes*

La quantification des flavonoïdes a été effectuée par la méthode colorimétrique au chlorure d'aluminium  $AlCl_3$  décrite par Shraim et al (2021).

#### *Analyse GC/MS*

L'appareil GC-MS de type Perkin Elmer Clarus 680 a été utilisé pour les analyses. Environ 1 à 2 mg d'extraits secs ont été prélevés dans les piluliers. Les échantillons de différents solvants ont subi une dérivation (réaction de silylation) avant l'injection afin de faciliter la solubilisation et la volatilité de tous les composés présents. Pour cela, 50  $\mu$ L de N,O-bis(triméthylsilyl)trifluoroacétamide (BSTFA) ont été ajoutés dans les piluliers puis laissés pendant 24 heures dans une étuve à 70°C. Après cette étape, le BSTFA a été évaporé, et l'extrait dérivé a ensuite été dissout dans 1 ml d'acétate d'éthyle. 1 à 3  $\mu$ L de cette solution ont été injectés dans le chromatographe.

#### *Activité antioxydante*

L'activité antioxydante a été évaluée par le radical DPPH selon la méthode décrite par Anokwuru et al (2017) avec le radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl.

L'activité antioxydante a été évaluée par le radical cationique ABTS<sup>+</sup> selon la méthode décrite par Piccolella et al (2008) avec le radical cationique 2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique).

## **Résultats**

#### *Taux d'extraits*

Les résultats obtenus indiquent que les taux d'extractibles varient d'un solvant à l'autre et avec la partie de l'arbre utilisée. Les taux d'extraits sont plus élevés pour l'écorce suivi de l'aubier puis le duramen. La littérature des bois tropicaux rapporte des taux d'extraits plus élevés au niveau de l'écorce que les autres parties de l'arbre (aubier et duramen) (Pohjamo et al 2003, Bopenga et al 2020, Ella et al 2022).

L'extraction successive qui combine solvants apolaires et polaires permet de partitionner les extractibles en différentes fractions facilitant les analyses ultérieures et la somme des extraits avec chaque solvant donne une idée de la teneur globale en extraits des écorces. Les taux d'extraits globaux des différentes parties étudiées sont de 7,69 % dans le duramen, 11,61% dans l'aubier et 37,3% dans l'écorce.

#### *Tests phytochimiques*

Les tests phytochimiques effectués sur *Letestua durissima* ont révélé la présence d'alcaloïdes, de polyphénols, de stérols et de triterpènes, de flavonoïdes et de saponines. La présence de toutes ces classes de composés dans les bois tropicaux a été reportée dans la littérature (Mounguengui et al 2016).

#### *Polyphénols totaux*

La concentration moyenne en polyphénols des parties de bois de *Letestua durissima* présente de différence significative d'un solvant à l'autre, d'une partie du bois à une autre. Les teneurs en polyphénols totaux des différentes fractions varient entre 95,56 et 47,64 mg d'équivalent acide gallique/g d'extraits secs. La concentration la plus élevée des phénols a été mesurée dans l'extrait acétonique, avec un taux de 95,56 mg d'équivalent acide gallique/g d'extraits secs, par rapport aux extraits toluène-éthanol et aqueux, où nous enregistrons des teneurs de l'ordre de 92,4 et 64,06 mg d'équivalent acide gallique/g d'extraits secs respectivement. Ce résultat s'explique par le fait que l'acétone est le premier solvant polaire utilisé suivi du mélange toluène-éthanol après l'extraction au dichlorométhane qui extrait les composés lipophiles ou les huiles contrairement à l'acétone qui extrait les composés phénoliques. La partie de l'écorce présente les meilleures concentrations en polyphénols suivie de l'aubier et enfin le duramen. Plusieurs travaux sur l'étude de vingt-deux bois tropicaux ont montré des résultats similaires (Saha-Tchinda et al 2015, Bopenga et al 2020).

#### *Tanins totaux*

Les résultats révèlent que les fractions acétone et toluène-éthanol de l'écorce de *Letestua durissima* renferment les plus importantes concentrations en tanins condensés, avec une valeur de 109,12 et 113,45 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs suivi du duramen qui a une teneur en tanins dans les extraits acétone (77,45 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs), toluène-éthanol 69,12 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs et aqueux 45,45 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs. Les faibles fractions étaient enregistrées dans l'aubier 61,62 ; 43,95 et 33,95 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs (respectivement dans l'extrait acétonique, le mélange toluène-éthanol et l'extrait aqueux). Cette variation peut s'expliquer par le fait que l'extraction des tanins condensés, dépend de leur nature chimique, du solvant utilisé et des conditions opératoires (Deba et al 2008).

#### *Flavonoïdes totaux*

Les résultats présentés montrent que les teneurs en flavonoïdes totaux varient considérablement entre les différents extraits et parties de bois (écorce, aubier et duramen). Les plus fortes concentrations en flavonoïdes se trouvent au niveau de l'écorce suivi du duramen et de l'aubier. L'extrait au toluène-éthanol enregistre la plus grande concentration en flavonoïdes (20,26 en équivalents mg catéchine/g d'extrait secs), suivi par l'extrait acétone (19,01 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs). Tandis que la plus faible concentration en flavonoïdes a été mesurée dans l'extrait aqueux (1,11 en équivalents mg catéchine/g d'extraits secs). La concentration des flavonoïdes dans les extraits de la plante *Letestua durissima*, dépend de la polarité des solvants utilisés dans la préparation des extraits (Marco et al 1968), de la partie de l'arbre étudiée. Les teneurs en flavonoïdes dans les extraits acétoniques et le mélange toluène-éthanol de l'aubier de *Letestua durissima* sont similaires à celles trouvées pour l'aubier du bois de *Coula edulis* (Bopenga et al 2021).

#### *Analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS)*

L'analyse de l'extrait d'écorce au cyclohexane par GC/MS indique la présence de nombreux terpènes dans le cyclohexane (également présent dans l'extrait au dichlorométhane) avec l'oléan-12-en-3-one et le (3 $\alpha$ )-oléan-12-en- Acétate de 3-yle comme composants principaux,

20% et 46% du courant ionique total (TIC). D'autres triterpènes comme les  $\alpha$  et  $\beta$ -amyrines ou la bétuline ont également été identifiés. Les mêmes composés ont été détectés dans l'extrait de dichlorométhane mélangé à d'autres composés comme les acides gras et les composés phénoliques (3,4-dihydroxybenzaldéhyde, acide 4-hydroxybenzoïque, acide isovanilique, acide protocatéchique) apparaissant à des temps de rétention (TR) inférieurs à ceux des terpènes. L'analyse de l'extrait acétonique indique la présence de composés assez similaires à ceux identifiés dans le dichlorométhane. Différents acides carboxyliques comme les acides benzoïque, sébacique, protocatéchique, hexadécanoïque, oléique ou octadécanoïque ont été identifiés et représentent 25% du TIC. Les produits restants identifiés dans les extraits acétoniques correspondent aux mêmes composés terpénoïdes que ceux identifiés dans le cyclohexane et le dichlorométhane. L'écorce de *Letestua durissima* apparaît donc comme une riche source de triterpènes.

L'aubier contient de grandes quantités d'oléan-12-én-3-one et de (3 $\beta$ )-oléan-12-én-3-yle représentant respectivement 20 et 39% du TIC, tandis que le bois de cœur contient des triterpènes en quantités relativement faibles. Dans tous les cas, à l'exception de la catéchine et de l'acide protocatéchique détectés dans l'extrait acétonique d'écorce, relativement peu de composés phénoliques ont été détectés dans les différents compartiments du bois. L'analyse des extraits d'aubier et de bois de cœur utilisant un solvant plus polaire comme l'acétone indique principalement la présence d'acides gras et de sucres. L'analyse GC-MS de l'extrait toluène/éthanol des différents compartiments (écorce, aubier et bois de cœur) a révélé uniquement la présence de sucres.

#### *Tests antioxydant*

Il ressort que l'activité antioxydant varie avec les différents solvant d'extraction et de la partie de l'arbre utilisé. La catéchine et le BHT ont présenté une activité antioxydante plus importante que les extractibles étudiés. En général, les valeurs de  $CE_{50}$  obtenues dans les différents solvants montrent une bonne capacité d'inhibition des radicaux DPPH. L'écorce et le duramen présentent les plus fortes activités antioxydantes. Pour la méthode DPPH, les extraits toluène-éthanol et acétone ont eu la plus petites valeurs  $CE_{50}$  (2,4 ppm et 2,39 ppm respectivement).

Le criblage phytochimique et les dosages des composés phénoliques ont mis en évidence la présence de plusieurs familles d'extractibles tels que les flavonoïdes, tanins et les polyphénols qui sont connus dans la littérature comme des très bons antioxydants (N'Guessan et al 2007, Trembl et Šmejkal 2016). La présence des tanins, des polyphénols et des flavonoïdes suggère la capacité de certains extraits de jouer un rôle majeur en tant qu'agent antioxydant (Tepe et al 2006, Kawamura et al 2011, Agati et al 2012). De plus, les analyses GC/MS de ces extractibles ont permis d'identifier des potentiels antioxydant comme la catéchine et les composés comme  $\beta$ -Amyrine, Olean-12-ène-3-one, Friedelan-3-one, Bétuline et le Stigmastérol qui peuvent être responsables de l'amélioration de l'activité antioxydante.

#### **Conclusion**

La détermination des teneurs en extraits a indiqué que l'écorce de *Letestua durissima* contenait des quantités plus élevées d'extraits que l'aubier et le bois de cœur. La teneur totale en extraits de l'écorce en utilisant des solvants de différentes polarités a atteint jusqu'à 37 %. Les analyses phytochimiques ont montré la présence de flavonoïdes, de polyphénols et de saponines dans les extraits des différents types de bois obtenus avec des solvants polaires tels que l'acétone, le toluène/éthanol (2/1, v/v) et l'eau, tandis que des terpènes et des terpénoïdes ont été détectés dans un solvant de polarité inférieure tel que le dichlorométhane. Des alcaloïdes ont été détectés dans tous les extraits, quel que soit le compartiment du bois. Les teneurs totales en polyphénols, tanins condensés et flavonoïdes ont confirmé les quantités élevées de composés détectés dans

les extraits d'écorce et de bois de cœur obtenus en utilisant des solvants polaires tels que l'acétone et le toluène/éthanol. L'analyse GC-MS des différents extraits a montré que les extraits d'écorce au dichlorométhane et à l'acétone contenaient des terpènes et des terpénoïdes, l'acétate de  $\beta$ -amyrine et l'éther triméthylsilylé d' $\alpha$ -amyrine étant les principaux composants. La présence d'acides gras, de polyphénols et d'acides phénoliques a été détectée dans les extraits d'écorce et de bois de cœur obtenus avec des solvants à polarité plus élevée. La mesure des activités antioxydantes à l'aide de l'activité de piégeage des radicaux ABTS<sup>+</sup> ou DPPH a indiqué que les extraits de bois de cœur et d'écorce à l'acétone ou au toluène/éthanol avaient les valeurs de CI<sub>50</sub> les plus faibles. L'extrait d'écorce au toluène-éthanol et l'extrait de bois de cœur à l'acétone présentaient des valeurs de CI<sub>50</sub> assez similaires de 2,40 et 2,39, respectivement, pour le test DPPH, tandis que la catéchine et le BHT présentaient des valeurs de 1,95 et 3,31, respectivement. L'extrait de bois de cœur au toluène/éthanol a affiché les valeurs IC<sub>50</sub> les plus faibles de 0,66 pour le test ABTS<sup>+</sup> en comparaison avec les valeurs de 0,38 et 0,46 pour la catéchine et le BHT, respectivement. Une comparaison avec les activités antioxydantes de la catéchine ou du BHT a indiqué que l'extrait de bois de cœur au toluène/éthanol présentait des activités antioxydantes plus ou moins similaires à celles de ces deux composés de référence, suggérant une valorisation potentielle en tant qu'antioxydant. Les relations structure-activité attribuent les propriétés antioxydantes de ces extraits à la présence de composés phénoliques contenus dans les extraits de bois de cœur et d'écorce.

## Références

- Agati G, Azzarello E, Pollastri S, Tattini M (2012) Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance, *Plant Sci* 196: 67-76.
- Akinjogunla OJ, Yah CS, Eghafona NO, Ogbemudia FO (2010) Antibacterial activity of leave extracts of *Nymphaea lotus* (Nymphaeaceae) on Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) and Vancomycin resistant *Staphylococcus aureus* (VRSA) isolated from clinical samples, *Annals of Biological Research* 1:174-184.
- Anokwuru C, Sigidi M, Zininga T, Tshisikhawe M, Shonhai A, Ramaite I, Traoré A, Potgieter N (2017) Phenolic contents, antioxidant activity and spectroscopic characteristics of *Pterocarpus angolensis* DC. stem bark fractions, *NISCAIR* 16: 400–406.
- Badiaga M, (2011) Etude ethnobotanique, phytochimique et activités biologiques de *Nauclea latifolia* Smith, une plante médicinale africaine récoltée au Mali, thèse de l'Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Bopenga Bopenga CSA, Meyo Degboevi H, Candelier K, Edou Engonga P, Dumarcay S, Thévenon MF, Gérardin Charbonnier C, Gérardin P (2021) Characterization of Extracts from the Bark of the Gabon Hazel Tree (*Coula edulis* Baill) for Antioxidant, Antifungal and Anti-Termite Products. *Journal of Renewable Materials*, 9(1): 17-33.
- Chamorro S, Viveros A, Alvarez I, Vega E, Brenes A (2012) Changes in polyphenol and polysaccharide content of grape seed extract and grape pomace after enzymatic treatment, *Food Chemistry*, 133, 308–314.
- Deba F, Dang Xuan T, Yasuda M, Tawata S (2008) Chemical composition and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of the essential oils from *Bidens pilosa* Linn. var. *Radiata*. *Food Control*, 19 ,346-352.
- Ella Nkogo LF, Bopenga Bopenga CSA, Ngohang FE, Mengome LE, Aboughe Angone S, Edou Engonga P (2022) Phytochemical and anti-termite efficiency study of *Guibourtia*

*Tessmannii* (Harms) J. Léonard (Kévazingo) bark extracts from Gabon. *J. Korean Wood Sci Technol*, 50, 113-125.

Houghton P, Raman A (1998) *Laboratory Handbook for the Fractionation of Natural Extracts* Springer US ISBN 978-1-4615-5809.

Kawamura F, Ramle S, Sulaiman O, Hashim R, Ohara S (2011) Antioxidant and antifungal activities of extracts from 15 selected hardwood species of Malaysian timber. *Eur J Wood Prod* 69(2):207–221.

N'guessan JD, Zirihi GN, Kra AKM, Kouakou K, Djaman AJ, Guédé-Guina F (2007) Activité de piégeage des radicaux libres, flavonoïdes et teneurs phénoliques de plantes ivoiriennes sélectionnées. *IJONAS*, 4: 425-429.

MARCO, Gino J (1968) A rapid method for evaluation of antioxidants. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1968, vol. 45, no 9, p. 594-598.

Mouele UGM, Nkoulembene CA, Kokolo B, Sevidzem SL (2022) Ethnobotanical and ethnopharmacological approach to ichthyotoxic plants of Gabon, *Journal of Medicinal Plants Research*, 16(5), 154-164.

Mounguengui WS, Saha Tchinda JB, Kor Ndikontar M, Dumarçay S, Attéké C, Perrin D, Gelhaye E, Gérardin P (2016) Total phenolic and lignin contents, phytochemical screening, antioxidant and fungal inhibition properties of the heartwood extractives of ten Congo Basin tree species, *Annals of Forest Science*, 73, 287–296.

Piccolella S, Fiorentino A, Pacifico S, D'Abrosca B, Uzzo P, Monaco P (2008) Antioxidant properties of sour cherries (*Prunus cerasus* L.): Role of colorless phytochemicals from the methanolic extract of ripe fruits. *J. Agric. Food Chem.* 56, 1928-1935.

Pohjamo SP, Hemming JE, Willför SM, Reunanen MHT, Holmbom BR (2003) Phenolic Extractives in *Salix caprea* Wood and Knots. *Phytochemistry*. 63(2), 165–69

Saha Tchinda JB (2015) Caractérisation et valorisation des substances extractibles de cinq essences camerounaises majeures de l'industrie du bois : Ayous, Moabi, Movingui, Padouk et Tali. Thèse de doctorat en sciences du bois et fibres, Université de Lorraine.

Shraim AM, Ahmed TA, Rahman MM, Hijji YM (2021) Determination of total flavonoid content by aluminum chloride assay: A critical evaluation, *WT Food Science and Technology*. 150 :111932.

Tepe B, Sokmen M, Akpulat HA, Sokmen A (2006) Screening of the antioxidant potentials of six *Salvia* species from Turkey, *Food chemistry*, 95(2):200-204.

Treml J, Šmejkal K (2016) Flavonoids as potent scavengers of hydroxyl radicals, *comprehensive reviews Food Sci Food Saf* 15(4):720-738.

Wootton-Beard PC, Aisling M, Ryan L (2011) Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after in vitro digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin–Ciocalteu methods *Food Res Int.*, 44, 217–224.

## **Projet ClimaLand : observation multidisciplinaire de l'impact de la gestion forestière sur le microclimat forestier dans un contexte de changement du macroclimat – Cas particulier du territoire des Landes de Gascogne**

LAVALETTE Anne<sup>1</sup>, DUPLEIX Anna<sup>1,2</sup>, RUFFIO Emmanuel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Co-Actions, coopérative d'activités et d'emplois – Groupe Recherche, Alt-R&D. 33130 Bègles.

<sup>2</sup>Laboratoire Crises, EA 4424, Université Paul Valéry, 34000 Montpellier  
[anne.lavalette@alt-rd.com](mailto:anne.lavalette@alt-rd.com)

**Mots clefs :** Microclimat ; Landes de Gascogne ; Température ; Changement climatique ; Gestion forestière ; Sciences sociales ; Développement de territoire

### **Contexte et objectifs**

Le lien entre la forêt et le climat n'est pas nouveau. La forêt capte du carbone grâce à la photosynthèse et aide ainsi à lutter contre le réchauffement climatique. Elle évapore également de l'eau, ce qui régule le climat localement (Gril 2024). Cependant, les pratiques de gestion forestière actuelles dans les Landes de Gascogne ont pour objectif principal la production de bois. Même si elles intègrent des principes de gestion durable, elles ne prennent pas en compte le potentiel climatique de la forêt. Cela s'explique en partie par :

- i- Le manque de données fiables, de connaissances précises ou d'outils permettant d'évaluer l'impact des modes de gestion forestière sur le microclimat forestier (Ogée 2020) ou sur la croissance et la santé des forêts : la partie technique du projet ClimaLand vise à répondre à ces manques de connaissances scientifiques identifiés.
- ii- Les freins socio-économiques et culturels, potentiellement importants sur le territoire concerné : ils seront identifiés et évalués au travers d'enquêtes de terrain qui s'appuient sur la méthodologie de l'enquête en sciences sociales.

La relation à la forêt sur ce territoire est complexe et historique. Depuis les tempêtes de 1999 (Martin) et 2009 (Klaus) qui ont bouleversé le milieu de la forêt et du bois, le modèle sylvicole prônant la culture mono-essence de pins maritimes est remis en cause. Des études visant à faire évoluer ce modèle sylvicole sont en cours (Michelot et al, 2013) mais elles sont difficilement appliquées sur le territoire. Ces catastrophes naturelles ont mis en lumière l'aspect identitaire du territoire et l'importance économique mais aussi sociale, environnementale et paysagère de cet espace. La conservation des surfaces dédiées à la forêt et la présence de la filière bois sur le territoire représentent pourtant des enjeux majeurs qui rassemblent les différents acteurs du territoire (sylviculteurs, chercheurs, élus, habitants, etc.) (Ouvrage collectif, 2011) mais qui doit s'adapter au contexte de changements macro-climatiques actuels et futurs. Les point de vue des acteurs d'horizons différents, variés, constituent une raison à la difficulté de créer un projet commun (qui ne signifie pas un projet unique) de développement de territoire, et plus spécifiquement pour notre étude, d'évolution des pratiques de gestion forestière.

### **Objectifs du projet :**

- Fournir des données de terrain qui mesurent l'influence des pratiques de gestion forestière sur la croissance des arbres, la santé des forêts et le microclimat forestier dans les forêts landaises. Données acquises en coopération avec des acteurs locaux ;



- Participer à l'amélioration des connaissances nationales sur le microclimat forestier, en lien avec d'autres projets nationaux (projets ANR IMPRINT<sup>2</sup>, MaCCMic<sup>3</sup> et Labex COTE<sup>4</sup>) ;
- Identifier les contraintes, les freins et les attentes des acteurs économiques de la filière bois sur leur territoire face à l'évolution des pratiques de gestion forestière ;
- Documenter la diversité des pratiques de gestion forestière actuelles et potentielles sur le territoire des Landes de Gascogne.

## Matériel et méthode

Cinq forêts de 10 à 20 ha sont incluses dans l'étude (Fig. 1)



Fig. 1 : Cartographie des cinq forêts incluses dans l'étude

### *Enquête auprès des propriétaires*

Un guide d'entretien permettra de mener les entretiens auprès des propriétaires et gestionnaires forestiers, avec trois objectifs principaux :

- Comprendre quels sont leurs usages et leurs savoirs de propriétaires et gestionnaires forestiers dans la forêt des Landes de Gascogne.
- Identifier les différents types de peuplements présents dans les cinq forêts de l'étude afin d'y réaliser les mesures scientifiques.
- Connaître les perceptions, contraintes et stratégies mises en œuvre par les propriétaires et gestionnaires forestiers face au changement du macroclimat.

### *Définition des points de mesure sur les placettes forestières au sein des cinq forêts*

- Suite aux entretiens, différentes placettes forestières seront sélectionnées sur chacune des cinq forêts, avec le propriétaire forestier (végétation uniforme, topographie particulière...)

<sup>2</sup> <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE32-0005>

<sup>3</sup> <https://anr.fr/Project-ANR-21-CE32-0012>

<sup>4</sup> <https://anr.fr/ProjetIA-10-LABX-0045/>

selon leur intérêt et leur diversité pour l'étude. Dans la mesure du possible, deux placettes similaires seront sélectionnées dans chaque forêt pour doubler les mesures.

- Le centre de chaque placette constituera un point de mesure (cf. paragraphe suivant).

#### *Mesures effectuées sur chaque placette*

Le microclimat forestier est influencé par de nombreux paramètres tels que la hauteur des arbres, leur taux de couverture (ombrage), la topologie de la forêt (rivière, relief...), l'accessibilité au vent, les essences présentes, la densité des arbres etc. (Gril 2024, Ogée 2020). Des données précises sur les caractéristiques locales des peuplements sont donc nécessaires afin d'identifier, lors de l'analyse des données, celles qui influencent les températures locales mesurées sous couvert forestier (= microclimat). Les protocoles de mesure suivants ont été définis pour chaque paramètre :

- Taux de couverture des arbres à l'aide d'objectifs Fisheye qui capturent des photos hémisphériques de la canopée.
- Températures sous couvert forestier : 20 capteurs fixes seront installés au centre des placettes (Fig. 2), dont une partie fournie par J. Ogée, INRAE EcoFun, Villenave d'Ornon (33). Les dispositifs de mesure de température resteront en place pendant 3 ans minimum et seront relevés et analysés tous les 2 mois.
- Données relatives à l'inventaire forestier : diamètres, hauteurs, âge, mortalité, essences, régénération naturelle.



Fig. 2 : Capteur de température installé au sein d'un ensemble d'assiettes (protection solaire, convection) pour mesurer la température de l'air ambiant, associé à une station météo.

Les mesures de diamètre, de hauteur, du taux de couverture et les observations relatives à la régénération naturelle seront réalisées deux fois par an sur trois ans (été et hiver).

### **Perspectives**

Sciences participatives : les mesures climatiques actuelles effectuées de nos jours à l'aide des stations météo sont toujours effectuées en dehors des forêts. Un manque de données sur le microclimat sous couvert forestier a été identifié. Les données relevées au cours de l'étude seront partagées dans les bases de données nationales (PEPR Forestt<sup>5</sup>) et internationales (SoilTemp<sup>6</sup>).

Les données récoltées seront analysées afin de comparer diverses situations forestières. Elles permettront également d'évaluer un modèle numérique développé par Jérôme Ogée, Klara

<sup>5</sup> <https://www.pepr-forestt.org>

<sup>6</sup> <https://www.soiltempproject.com>

Bouwen et Rémi Lemaire-Patin (INRAE). Ce modèle permet d'évaluer l'impact de la gestion forestière sur le microclimat en sous-bois et les conditions de régénération naturelle des forêts à des échelles de 1 à 5 ans. Un outil d'aide à la décision, basé sur ce modèle et à l'intention des gestionnaires forestiers, est également en cours de développement par INRAE.

Un recueil des pratiques de gestion forestières sur le territoire sera réalisé. L'effet des pratiques observé sur le microclimat forestier, la santé des forêts, leur régénération mais également sur les rendements en bois sera précisé en fonction des caractéristiques locales des peuplements. L'expérience de chaque sylviculteur, gestionnaire ou propriétaire pourra ainsi être accessible au plus grand nombre et permettre une diffusion des connaissances utile à tous.

## Remerciements

Nous tenons à remercier Eva Gril, Klara Bouwen, Jérôme Ogée, Jonathan Lenoir, Franck Gandiaga et leurs équipes dont les thèmes de recherche proches ont permis des échanges ouverts, constructifs et prometteurs. Ce projet est rendu possible par les soutiens financier et humain de :

La Fédération Léo Lagrange<sup>7</sup>, financeur d'une étude complémentaire pour intégrer des Géonautes (services civiques d'apprentis chercheurs) dans des projets locaux.

Le Fonds Archimbaud<sup>8</sup> pour l'Homme et la Forêt.

Nous les remercions.

## Références

Michelot A, Gachet S, Legay M, Landmann G (2013) L'autécologie des essences forestières et son intégration dans les outils d'aide à la décision : synthèse et évaluation. Etude. Gip Ecofor. 45 p.

Gril E (2024) Modelling forest microclimate and its consequences on understory flora under climate change, thèse de l'Université de Picardie Jules Verne. 268p.

Ouvrage Collectif (2011) Tempêtes sur la forêt landaise, histoires, mémoires. L'atelier des Brisants. Actes de deux colloques organisés par la société de Borda. 1- «Les Landes de Gascogne à l'épreuve de la tempête », colloque organisé par le Parc naturel régional des Landes de Gascogne, Pavillon de Marquèze, Sabres (40), 5-6 février 2010. 2- « Klaus et les fléaux de la forêt landaise à travers l'histoire », colloque de Rions des Landes (40), 23 janvier 2010.

Ogée J (2020) Climat, espèces et adaptation : le rôle de la gestion forestière. The Conversation. 8 p. [Climat, espèces et adaptation : le rôle de la gestion forestière \(theconversation.com\)](https://www.theconversation.com)

---

<sup>7</sup> <https://www.leolagrange.org>

<sup>8</sup> <https://www.groupe-archimbaud.com/>

## Survie de bactéries multirésistantes (BMR) sur des bois bruts de Douglas et de Pin maritime.

TAISNE Audrey<sup>1</sup>, AVIAT Florence<sup>2</sup>, MINTSA Morel Essono<sup>3</sup>, BELLONCLE Christophe<sup>3</sup>, PAILHORIE Hélène<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Centre Hospitalier Universitaire, Laboratoire de bactériologie-hygiène, Angers, France,

<sup>2</sup>Your ResearchH-Bio-Scientific, Le Landreau, France,

<sup>3</sup>Ecole Supérieure du Bois, Laboratoire Innovation Matériau Bois Habitat (LIMBHA), Nantes, France,

<sup>4</sup>Université d'Angers, Laboratoire HIFIH, UPRES EA3859, SFR 4208, Angers, France  
[christophe.belloncle@esb-campus.fr](mailto:christophe.belloncle@esb-campus.fr)

**Mots clés :** contamination bactérienne, bactéries multirésistantes, propriétés antibactériennes, *Pseudotsuga menziesii*, hygiène

### Contexte et objectif

Le bois est un matériau renouvelable, récemment mis en avant pour son impact positif sur le stress et les paramètres physiques des patients dans les bâtiments de santé (Burnard and Kutnar 2015, Kotradyova et al 2019). Cependant, ces derniers doivent respecter des normes d'hygiène spécifiques. En France, les normes NF ISO 14644 partie 4 et 9 (AFNOR a, b) sur les salles propres et les environnements maîtrisés (incluant certaines parties des établissements de santé) suggèrent l'utilisation de surfaces lisses et non poreuses, excluant généralement le bois en raison de sa porosité. Pourtant, des études récentes ont montré que certaines essences de bois, comme le Chêne et le Douglas, possèdent des propriétés antibactériennes (Chen et al., 2020). Ces propriétés peuvent limiter la survie et la transmission des micro-organismes responsables des infections nosocomiales (Munir et al 2021).

L'objectif de ce travail est d'étudier la survie des bactéries multirésistantes (BMR) sur plusieurs matériaux incluant deux essences de bois.

### Méthodes

La survie de *Klebsiella pneumoniae* ATCC700603 (Kpn) productrice de bêta-lactamase à spectre étendu et d'*Enterococcus faecalis* ATCC 51299 (Ef) résistant aux glycopeptides a été évaluée sur des échantillons de bois, issus du duramen, de 10 mm de diamètre de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas) et de *Pinus pinaster* (Pin maritime), et comparés à de l'acier inoxydable et à de la pierre ponce, ainsi que vis-à-vis de *Pseudotsuga menziesii* recouvert d'un vernis antibactérien (à base de nitrate d'argent). La désinfection des surfaces (solution d'Ecoseptol Foam) est également testée. Un inoculum de 10<sup>8</sup> bactéries a été déposé sur chaque matériau et la survie bactérienne a été mesurée sur 15 jours (Fig. 1). L'analyse statistique est effectuée par le test de Kruskal Wallis suivi du test de Dunn (comparaison multiple) en utilisant XLSTAT (Addinsoft, Paris). Une version détaillée en anglais a été publiée dans Scientific Report (Taisne et al 2024).

### Résultats

La distribution des numérations bactériennes est significativement plus faible de J0 à J15 pour les deux BMR sur Douglas (Fig. 2A, 2B) par rapport à l'acier inoxydable (Ef p = 0,003 ; Kpn p

= 0,005) ou à la pierre ponce (Ef p = 0,017 ; Kpn p = 0,031). De plus, le temps de survie de *Klebsiella pneumoniae* est plus court que celui d'*Enterococcus faecalis* sur les matériaux.

Aucune différence significative de survie des deux BMR n'a été constatée entre le Pin maritime et l'acier inoxydable (Ef p > 0,12 ; Kpn p > 0,36) (Fig. 2C, 2D), ni entre le Douglas verni et les deux autres matériaux (p>0,1). Aucune survie bactérienne n'a été détectée sur le Douglas après application du protocole de désinfection.

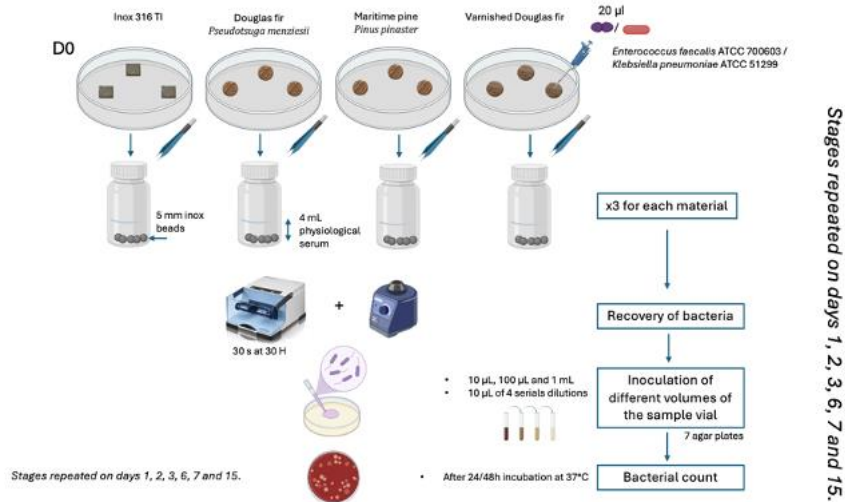


Fig. 1 : Schéma expérimental

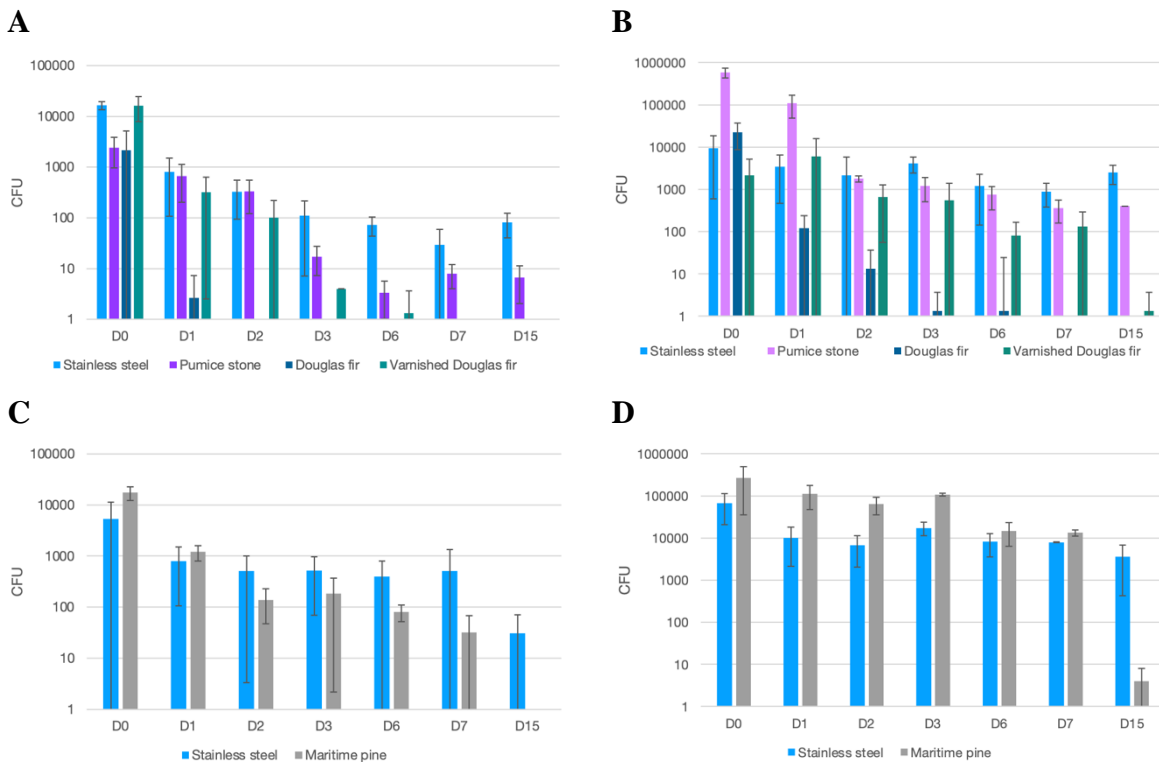


Fig. 2 : Numérations bactériennes de *Klebsiella pneumoniae* (A, C) et d'*Enterococcus faecalis* (B, D) en unités formatrices de colonies (CFU) récupérées à partir de différents matériaux (Stainless steel : acier ; Pumice stone : pierre ponce ; Douglas fir : *Pseudotsuga menziesii* ; Maritime pine : *Pinus pinaster* ; Varnished Douglas Fir : *Pseudotsuga menziesii* vernis antibactérien)

Ces travaux confirment les résultats obtenus précédemment sur l'activité antibactérienne variable d'une espèce de bois à une autre (Munir et al 2019). Le Douglas montre ici une activité antibactérienne du même ordre que le Chêne, supérieure à celle du Peuplier ou du Pin maritime. Les propriétés physiques (comme la porosité) et la composition chimique (comme les terpènes, les flavonoïdes) des différentes espèces sont souvent citées comme influençant ces différents effets antibactériens (Munir et al 2021). La comparaison entre le bois et la pierre ponce apporte ici une réponse quant à l'influence faible de la porosité du bois sur le développement bactérien.

## Conclusion

*Pseudotsuga menziesii* est intéressant en milieu hospitalier pour ces propriétés antibactériennes naturelles sur bactéries multirésistantes. L'application de traitements antibactériens par vernis sur le bois de Douglas a réduit son efficacité par rapport au bois brut, tandis que la désinfection itérative a empêché la colonisation bactérienne. Des études complémentaires sont nécessaires pour préciser ces propriétés, et le cas échéant son comportement dans le cadre d'un processus de désinfection à long terme.

## Remerciements

Les auteurs remercient le CODIFAB pour le co-financement de ces travaux (ESaBII 2022-2023).

## Références

- AFNOR (2022a) Salles propres et environnements maîtrisés apparentés - Partie 4 : conception, construction et mise en service.
- AFNOR (2022b) Salles propres et environnements maîtrisés apparentés - Partie 9 : Evaluation de la propreté des surfaces par la concentration de particules.
- Burnard MD, Kutnar A (2015) Wood and human stress in the built indoor environment: a review. *Wood science and technology* 49, 969–986.
- Chen J-C, Munir MT, Aviat F, Lepelletier D, Le Pape P, Dubreil L, Irle M, Federighi M, Belloncle C, Eveillard M, Pailhoriès H (2020) Survival of Bacterial Strains on Wood (*Quercus petraea*) Compared to Polycarbonate, Aluminum and Stainless Steel. *Antibiotics* 9, 804. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9110804>
- Kotradyova V, Vavrinsky E, Kalinakova B, Petro D, Jansakova K, Boles M, Svobodova H (2019) Wood and Its Impact on Humans and Environment Quality in Healthcare Facilities. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 3496.
- Munir MT, Pailhoriès H, Aviat F, Lepelletier D, Pape PL, Dubreil L, Irle M, Buchner J, Eveillard M, Federighi M, Belloncle C (2021) Hygienic Perspectives of Wood in Healthcare Buildings. *Hygiene* 1, 12–23. <https://doi.org/10.3390/hygiene1010002>
- Munir MT, Pailhories H, Eveillard M, Aviat F, Lepelletier D, Belloncle C, Federighi M (2019) Antimicrobial Characteristics of Untreated Wood: Towards a Hygienic Environment. *Health* 11, 152–170. <https://doi.org/10.4236/health.2019.112014>
- Taisne A, Aviat F, Essono Mintsu M, Belloncle C, Pailhoriès H (2024) The survival of multi-drug resistant bacteria on raw Douglas fir material. *Sci Rep* 14, 3546. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53983-4>

## Amélioration de la résolution de cartographie térahertz par méthode de déconvolution

MARC Caroline, MARCON Bertrand, DENAUD Louis, GIRARDON Stéphane,  
ROUX Benjamin

Arts et Metiers Institute of Technology, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté, F-71250 Cluny, France

[Caroline.Marc@ensam.eu](mailto:Caroline.Marc@ensam.eu)

**Mots clés :** Téraherz, Imagerie, Densitométrie, Déconvolution, Réseau de neurones

### Contexte et objectifs

Les systèmes d'imagerie par ondes térahertz (THz) suscitent un intérêt croissant dans de nombreux domaines, notamment pour l'analyse non destructive de matériaux tels que les bois, et ce grâce à leur bonne pénétrabilité, en tant que matériaux diélectriques, et leur caractère non-ionisant. Des essais préliminaires visant à démontrer la faisabilité de l'utilisation d'ondes THz pour la mesure de la masse volumique du bois, dans le but de remplacer les mesures par rayons X qui sont ionisantes, montrent des résultats très prometteurs (Marc et al 2023). Cependant, l'une des principales limitations de ces systèmes réside dans leur résolution spatiale, qui dépend directement de la longueur d'onde utilisée. En particulier, les systèmes d'émission THz employant des ondes millimétriques cohérentes génèrent un faisceau gaussien, tels que modélisé par Dickson (1970) et illustré à la Fig. 1b, différents d'un faisceau idéalement focalisé comme illustré à la Fig. 1a.

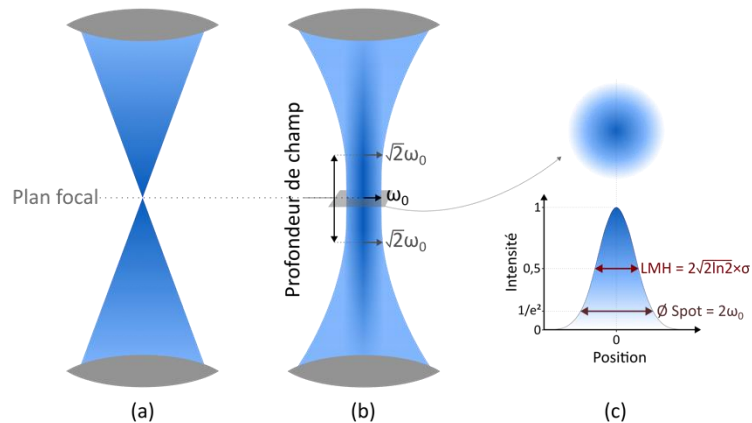


Fig. 1 : (a) Focalisation idéale ; (b) Faisceau gaussien ; (c) Représentation du spot gaussien et de son profil,  $LMH$  = Largeur à Mi-Hauteur

Lorsqu'un objet réel  $I_0$  est capturée avec un système d'imagerie ayant une fonction d'étalement de point  $PSF$  (Point Spread Function en anglais) en présence d'un bruit additif indépendant  $n$ , l'image observée résultante  $I$  répond à l'équation suivante :

$$I(x, y) = I_0(x, y) \otimes PSF + n(x, y) \quad (1)$$

La  $PSF$  d'un système décrit la réponse d'un système d'imagerie à un objet ou une source ponctuelle. Dans le cas du système d'imagerie THz étudié, la  $PSF$  correspond au spot gaussien schématisé sur la Fig. 1c. La convolution de cette  $PSF$  avec l'image réelle entraîne un flou dans les cartographies acquises, compliquant l'observation de certains détails, comme les variations de densité au sein des cernes annuels.

La déconvolution est un procédé visant à inverser les effets de la convolution. L'objectif de cette étude est donc de déconvoluer les cartographies THz afin de restaurer de façon optimale les détails et contrastes de ces images. La première étape sera la caractérisation de la *PSF*. Une fois celle-ci connue, plusieurs méthodes de déconvolution seront éprouvées sur des cartographies THz d'échantillons de douglas (*Pseudotsuga menziesii*), en utilisant les cartographies obtenues par imagerie rayons X comme référence.

## Matériels et méthodes

### *Echantillons mesurés*

Pour cette étude, 8 échantillons de douglas ont été étudiés. Ces échantillons proviennent d'une coupe radiale, ce qui permet d'observer dans le plan de la mesure l'alternance de densité intracorne entre bois initial et bois final, particulièrement marquée chez le douglas, et donc a priori visible sur les mesures présentées par la suite. Ils mesurent 130 mm (L) × 60 mm (R), avec une épaisseur de 3 mm (T) pour la moitié des échantillons et de 5 mm pour l'autre moitié. Afin de faciliter la comparaison entre les différentes méthodes de mesures, tous les échantillons sont percés ( $\emptyset = 6$  mm) dans trois de leurs coins, permettant d'ajuster les différentes cartographies entre elles.

### *Systèmes de mesure*

Les échantillons sont tout d'abord scannés à l'aide d'un scanner optique industriel équipé, entre autres, d'un système d'imagerie par transmission de rayons X. Ce processus a généré des cartographies bidimensionnelles en niveaux de gris de 12 bits (*i.e.* de 0 à 4095). Ces niveaux de gris sont directement proportionnels à l'intensité du rayonnement X transmis et, par conséquent, liés à la masse volumique selon la loi de Beer-Lambert (Kim et al 2006). Ainsi, les cartographies obtenues par imagerie rayons X serviront de référence pour la comparaison avec les mesures par rayonnement THz.

Celles-ci sont effectuées à l'aide d'un système d'imagerie THz en transmission, illustré sur la Fig. 2, composé d'une source (TeraSchottky, Lytid) émettant à 136 GHz, d'un détecteur (TeraPyro, Lytid), d'optiques, et d'un système permettant de déplacer l'échantillon dans le plan focal pour obtenir des cartographies de résolution 1 mm × 1 mm.

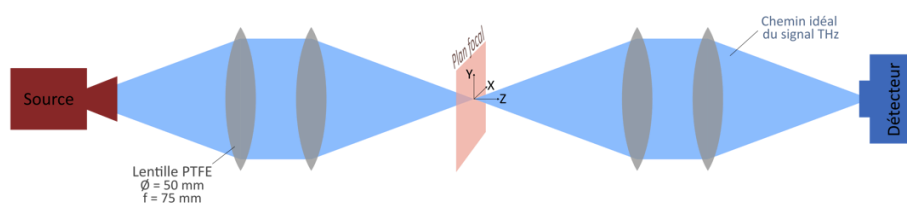


Fig. 2 : Schéma du système de mesure THz

### *Estimation de la résolution spatiale du système de mesure THz*

Pour estimer le profil du faisceau, et plus particulièrement caractériser le spot THz au niveau du plan focal, le test du couteau (Chiu et Pan 2007, Khosrofian et Garetz 1983) a été effectué. Cette méthode, schématisée sur la Fig. 3, consiste en l'obstruction progressive du faisceau à l'aide d'une lame métallique (mince et parfaitement opaque aux ondes THz), afin de pouvoir corréler l'intensité du signal perçu par le détecteur à la position de la lame. A une hauteur  $z$  fixe, l'intensité détectée en fonction de la position de l'extrémité de la lame (croix orange sur la Fig. 3) correspond à la primitive du profil d'intensité locale du faisceau. Le profil d'intensité du faisceau permet de calculer l'écart-type  $\sigma$  de la *PSF* et le diamètre du spot, comme exposé à la Fig. 1c. Pour cette étude, le couteau a été déplacé en  $Z$  avec un pas de 5 mm entre les deux



lentilles bornant la zone de focalisation, et en  $X$  avec un pas de 1 mm sur une longueur égale au diamètre des lentilles. Cette opération a ensuite été répétée mais cette fois en déplaçant le couteau dans le plan ( $Y, Z$ ), pour vérifier la circularité du faisceau.

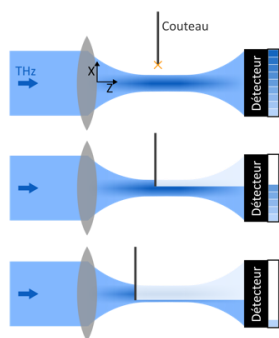


Fig. 3 : Schéma simplifié du fonctionnement du test du couteau

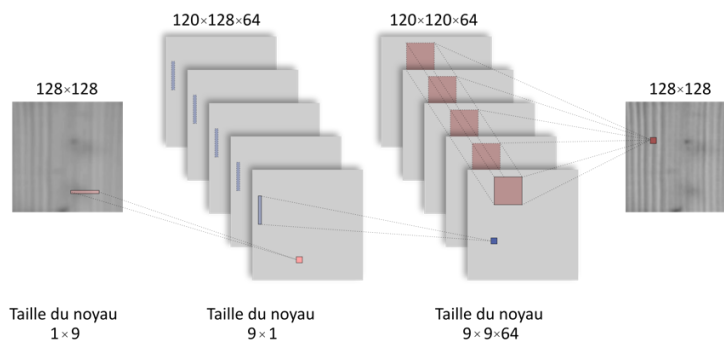


Fig. 4 : Architecture du réseau de neurones pour la déconvolution (inspiré de Xu et al 2014)

### Méthodes de déconvolution

Une fois la *PSF* déterminée, différentes approches de déconvolution ont été appliquées pour restaurer les cartographies THz. Trois méthodes ont été comparées : deux méthodes de référence, très couramment utilisées pour les déconvolutions non-aveugle (*i.e.* avec une *PSF* connue), qui sont la méthode de Wiener (1949) et l'algorithme de Richardson-Lucy (RL) (Lucy 1974, Richardson 1972), ainsi qu'une méthode de déconvolution par réseau de neurones convolutifs (CNN).

La méthode de déconvolution par CNN utilisée dans cette étude s'inspire de celle proposée par Xu et al (2014), également utilisée par Ljubenović et al (2020) pour des images THz. L'architecture du réseau, illustrée sur la Fig. 4, est conçue pour imiter certaines caractéristiques des méthodes classiques de déconvolution, notamment la décomposition en valeurs singulières (SVD) (Hendler et Shrager 1994), tout en bénéficiant de l'apprentissage automatique. Les deux premières couches appliquent des convolutions avec des noyaux orientés horizontalement et verticalement pour extraire les variations directionnelles de l'image. La dernière couche réalise une convolution avec un grand noyau carré, permettant une reconstruction globale. Contrairement à la SVD, où les filtres sont statiques, ici ils sont optimisés pendant l'entraînement, ce qui rend la méthode plus flexible et adaptée aux spécificités des images THz.

Pour entraîner et évaluer le réseau, un jeu de données composé de couples d'images « dégradées » (image d'entrée) et de leurs équivalents « nettes » (image de vérité terrain) a été créé. Étant donnée la haute résolution du système de mesure par rayons X, la large base de données de scans RX de planches disponibles au LaBoMaP a été utilisée pour confectionner ce jeu de données. Les cartographies de 1230 planches d'essences diverses (thuya, chêne, hêtre, épicéa, douglas et balsa) ont été normalisées entre 0 et 1 puis débruitées avant d'être découpées en 16 058 images de  $128 \times 128$  px<sup>2</sup>, constituant ainsi le lot d'images de vérité terrain. Le lot d'images d'entrée est lui obtenu en convoluant ces images avec la *PSF* déterminée à l'étape précédente.

Le jeu de données est divisé en trois parties : données d'entraînement (64%), données de validation (16%) et données de test (20%). Les données d'entraînement servent à ajuster les poids du modèle, les données de validation permettent d'évaluer les performances en cours d'entraînement et de prévenir le surapprentissage. Les données de test estiment les performances finales du modèle sur des données non-traitées par l'algorithme d'apprentissage.

## Résultats et discussions

### Estimation de la PSF

Les résultats des tests du couteau effectués dans les directions  $X$  et  $Y$  sont illustrés dans la Fig. 5, et les caractéristiques de la  $PSF$  qui en ont été extraites sont exposées dans le Tab. 1. Les profils de la  $PSF$  dans les directions  $X$  et  $Y$  sont sensiblement différents, avec des diamètres de spot qui diffèrent d'environ 0,5 mm. Cet écart est possiblement dû à une réelle asymétrie du faisceau, peut-être causée par les lentilles ou la source elle-même, mais peut être également expliqué par les différentes conditions entre les deux mesures, qui n'ont notamment pas été effectuées le même jour. Pour le reste de cette étude, l'écart entre les deux mesures sera considéré comme négligeable, et le spot comme parfaitement circulaire. L'écart-type utilisé par la suite sera la moyenne des deux écart-types calculés. Par ailleurs, la profondeur de champ (cf Fig. 1) s'est révélée complexe à déterminer précisément à cause de l'irrégularité du diamètre du faisceau observable sur la partie gauche de la Fig. 5, qui semble être due à des cavités de Fabry-Pérot (Colegrave et Abdalla 1981), mais reste nettement supérieure (minimum 15 mm) à l'épaisseur des échantillons étudiés (maximum 5 mm).

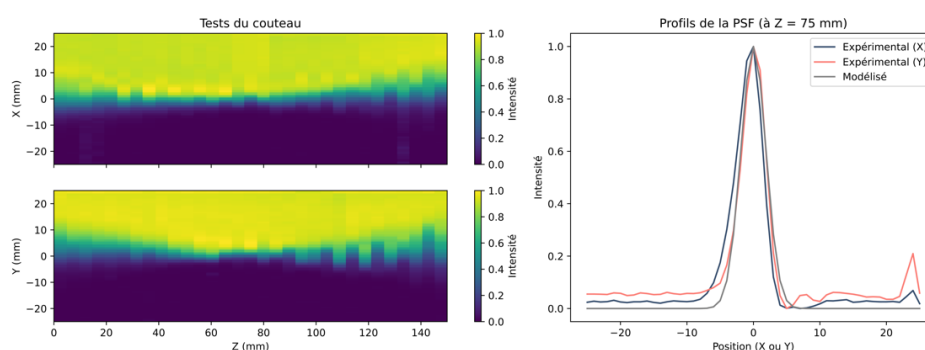


Fig. 5 : Résultats des tests du couteau et profils expérimentaux et théoriques de la PSF

Tab. 1 : Caractéristiques de la  $PSF$  mesurée dans les directions  $X$  et  $Y$

Axe	$\sigma$ (mm)	$\varnothing$ Spot (mm)
$X$	1,96	8,46
$Y$	1,82	7,92

### Résultats de la déconvolution

Les cartographies obtenues par rayons  $X$  et par THz, ainsi que les résultats des différentes méthodes de déconvolution, pour un des échantillons de douglas de 5 mm d'épaisseur, sont présentées sur la Fig. 6. La photographie de l'échantillon permet de relever 9 cernes annuels, ce qui est également le cas de la cartographie RX. En revanche, la cartographie originale THz ne permet pas de toutes les discerner, le diamètre du spot THz étant plus large que la largeur de certains cernes. Toutefois, la déconvolution permet d'en restaurer certains, comme cela est visible dans les zooms de la Fig. 6. Une amélioration de la résolution est observable pour les 3 méthodes, et en particulier pour la déconvolution de Wiener, où 9 cernes sont également clairement observables.

D'un point de vue qualitatif, les cartographies THz déconvoluées semblent donc se rapprocher de la référence, obtenue par RX. Concernant le point de vue quantitatif, la Fig. 7 permet d'observer le coefficient de détermination de la régression linéaire entre RX et THz par échantillon. Tout d'abord, il est notable que, avec ou sans déconvolution, les  $R^2$  sont meilleurs pour les échantillons les plus fins. Pour les échantillons de 5 mm d'épaisseur, les valeurs de  $R^2$  pour les THz déconvolués sont relativement similaires aux valeurs des THz convolués, il n'y a

pas d'amélioration remarquable due à la déconvolution. En revanche, pour les échantillons de 3 mm d'épaisseur, à l'exception de la méthode de Richardson-Lucy, la déconvolution améliore grandement la corrélation RX-THz. En effet, sur les 4 échantillons les plus fins, la déconvolution par CNN améliore les  $R^2$  de 14 points en moyenne, et de 25 points pour la déconvolution de Wiener, ce qui double quasiment les valeurs d'origines.

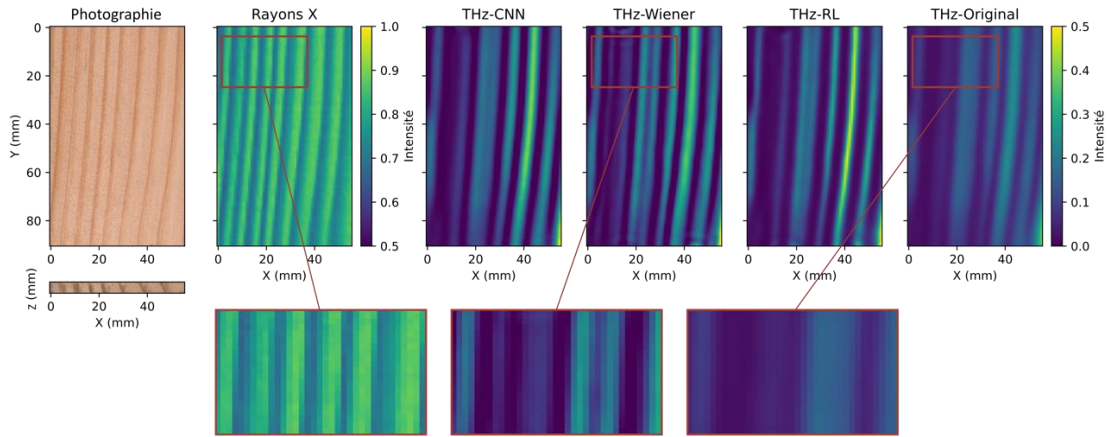


Fig. 6 : Photographie d'un échantillon (n°6) de douglas de 5 mm d'épaisseur et de sa tranche, sa cartographie obtenue par rayons X et par THz, et les résultats de la déconvolution de 3 manières différentes (réseau de neurones, Wiener et Richardson-Lucy)

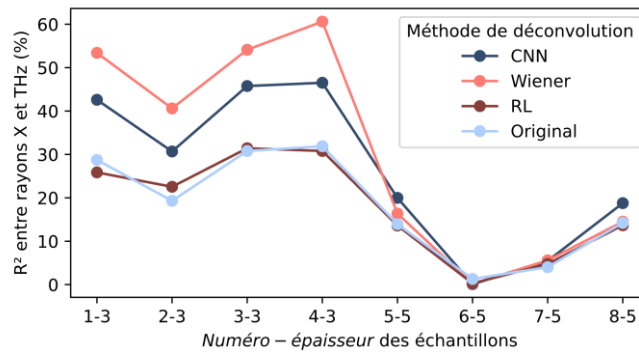


Fig. 7 : Coefficients de détermination entre les cartographies rayons X et THz, pour chaque échantillon, et pour chaque méthode de déconvolution

Les cartographies présentées à la Fig. 6, qui sont pourtant visiblement similaires les unes des autres, sont celles de l'échantillon 6-5, qui possède le  $R^2$  le plus bas, proche de zéro. Cette faible valeur, et celles des autres échantillons de 5 mm, pourrait s'expliquer de par la discontinuité du milieu traversé par l'onde au sein de l'échantillon due à l'inclinaison de cerne par rapport à l'axe Z (débit difficilement parfaitement radial), comme cela est visible sur la photographie de la tranche à la Fig. 6. Les différences d'interaction onde-matière entre les RX et les THz font alors que les 2 types de scans donnent des résultats différents pour un milieu non-uniforme, et à inclinaison de cerne constante, cette non-uniformité est logiquement plus visible chez les échantillons les plus épais.

## Conclusions et perspectives

Cette étude a démontré le potentiel des systèmes d'imagerie THz pour évaluer la masse volumique du bois de manière non destructive. Bien que les cartographies obtenues se rapprochent des mesures de référence par rayons X, la résolution spatiale limitée par la *PSF* du faisceau THz engendre une dégradation perceptible. Les méthodes de déconvolution testées (Wiener, Richardson-Lucy, CNN) ont amélioré la qualité des cartographies, en particulier la

déconvolution de Wiener, qui a montré les meilleurs résultats. Cependant, l'efficacité de la déconvolution dépend fortement de la précision de la modélisation de la *PSF*. Les perspectives incluent une meilleure caractérisation du faisceau, ainsi qu'une amélioration du CNN, en optimisant l'architecture du réseau et en enrichissant le jeu de données d'entraînement.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse financée par l'ANR BOOST (ANR-21-CE43-0008-02). Les auteurs remercient également la plate-forme technique Xylomat financée par l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST qui largement été utilisée pour réaliser cette étude.

## Références

Chiu Y, Pan J-H (2007) Micro knife-edge optical measurement device in a silicon-on-insulator substrate. *Opt. Express* 15, 6367. <https://doi.org/10.1364/OE.15.006367>

Colegrave RK, Abdalla MS (1981) A Canonical Description of the Fabry-Pérot Cavity. *Opt. Acta Int. J. Opt.* 28, 495–501. <https://doi.org/10.1080/713820584>

Dickson LD (1970) Characteristics of a Propagating Gaussian Beam. *Appl. Opt.* 9, 1854. <https://doi.org/10.1364/AO.9.001854>

Hendler RW, Shrager RI (1994) Deconvolutions based on singular value decomposition and the pseudoinverse: a guide for beginners. *J. Biochem. Biophys. Methods* 28, 1–33. [https://doi.org/10.1016/0165-022X\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0165-022X(94)90061-2)

Khosrofian JM, Gartz BA (1983) Measurement of a Gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data. *Appl. Opt.* 22, 3406. <https://doi.org/10.1364/AO.22.003406>

Kim K-M, Lee S-J, Lee J-J (2006) Development of portable X-ray CT system 1-evaluation of wood density using X-ray radiography. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 34, 15–22.

Ljubenović M, Bazrafkan S, De Beenhouwer J, Sijbers J (2020) CNN-based Deblurring of Terahertz Images. In: *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. Presented at the 15th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Valletta, Malta, pp. 323–330. <https://doi.org/10.5220/0008973103230330>

Lucy LB (1974) An iterative technique for the rectification of observed distributions. *Astron. J.* 79, 745. <https://doi.org/10.1086/111605>

Marc C, Marcon B, Denaud L, Girardon S, Butaud J-C (2023) Preliminary performance evaluations of non-ionizing terahertz wood densitometry. In: *20th International Conference on Experimental Mechanics*. Presented at the 20th international conference on experimental mechanics, Porto, Portugal.

Richardson WH (1972) Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. *J. Opt. Soc. Am.* 62, 55. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000055>

Wiener N (1949) *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series: With engineering applications*. MIT Press 113, 1043–54. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2946.001.0001>

Xu L, Ren JS, Liu C, Jia J (2014) Deep Convolutional Neural Network for Image Deconvolution. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 27, 1790–1798.

## **Comparaison des polluants émis par les briquettes combustibles produites à base de la sciure de bois carbonisée à celles du charbon de bois traditionnel.**

NGANKO Junior<sup>1,2</sup>, KOFFI Ekoun Paul Magloire<sup>1</sup>, GBAHA Prospère<sup>1</sup>,  
YAO Benjamin Kouassi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institut National Polytechnique Felix Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INP – HB)

<sup>2</sup>Centre d'Excellence d'Afrique pour la Valorisation des déchets en Produits à haute Valeur ajoutée (CEA - VALOPRO)

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

**Mots clefs :** Briquettes combustibles ; sciure de bois ; déforestation ; émissions polluantes.

### **Introduction**

Le bois, le charbon de bois et les déchets de récoltes sont les combustibles solides couramment utilisés dans les pays en développement pour la cuisine et le chauffage domestique. Cependant, ils sont responsables de la pollution de l'air intérieur (HEI 2020). Les intoxications par inhalation ou par exposition aux gaz dégagés sont causées par leur combustion à l'intérieur (WHO 2014). Cependant, il est utilisé par environ 3,6 milliards de personnes à travers le monde (Lai et al. 2020). En Afrique subsaharienne, environ 70 % de la population se sert de la biomasse traditionnelle, principalement du bois de chauffage et de son charbon pour la cuisson quotidienne (Ajieh et al 2021, Piabuo et Puatwoe 2020). Jusqu'à présent, l'évaluation des polluants émis par l'utilisation des briquettes combustibles n'a pas suscité d'intérêt. Afin de pallier cette lacune, cette recherche examine et compare les émissions de CO<sub>2</sub> des briquettes combustibles et du charbon de bois. Afin d'atteindre cet objectif, on utilise le LEMS associé au test d'ébullition de l'eau. Les conclusions tirées permettront d'approfondir la compréhension des défis associés à l'utilisation des briquettes combustibles, en particulier ses bénéfices pour le climat et la santé des utilisateurs.

### **Méthodologie**

La Fig. 1 présente la synthèse méthodologique déployée pour évaluer et comparer les émissions de dioxyde de carbone des briquettes combustibles à celles du charbon de bois communément utilisés par les ménages.

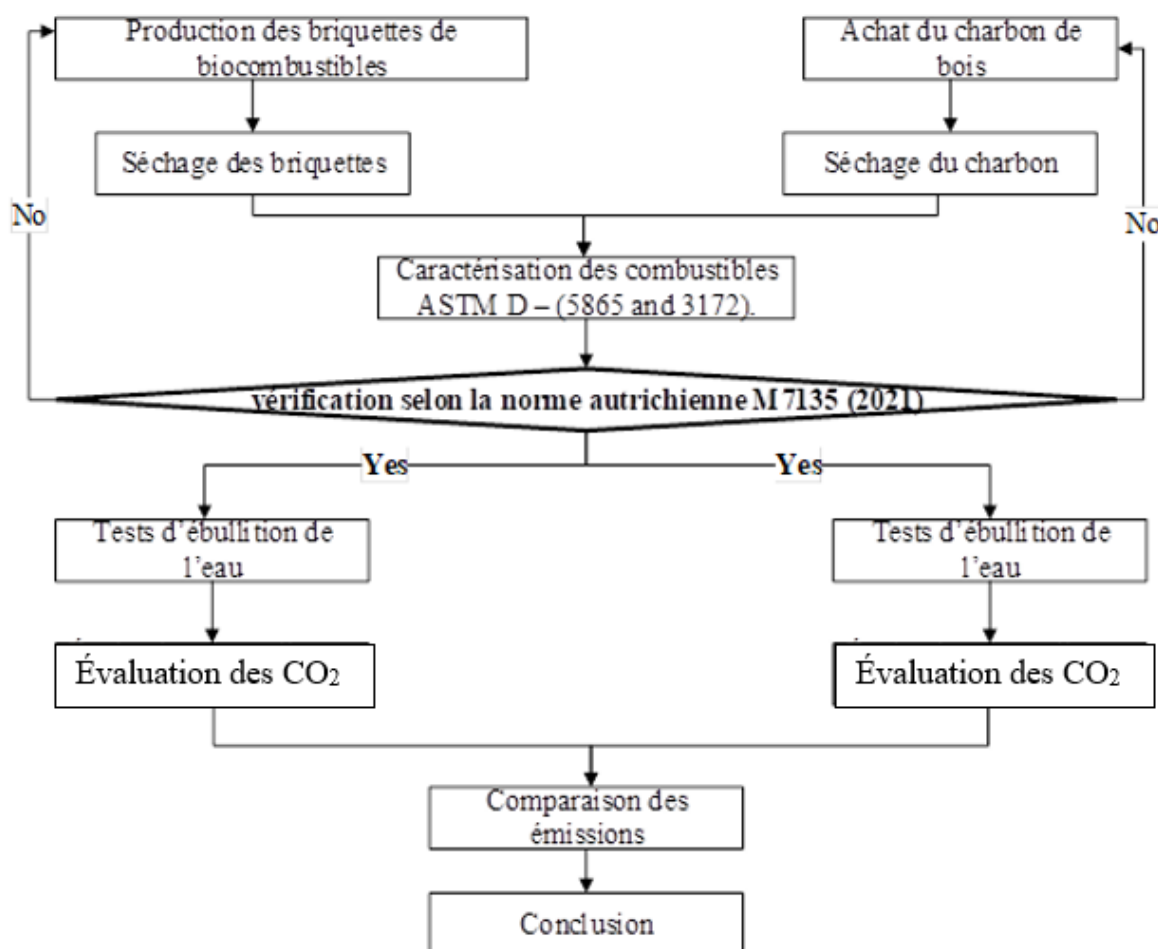


Fig. 1 : Synthèse méthodologique

## Résultats et discussion

Les courbes des Fig. 2a et 2b illustrent les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des briquettes combustibles et du charbon de bois respectivement.

Au début du test, les émissions des biocombustibles dépassent celles du charbon de bois. Cette observation peut être attribuée au taux élevé d'absorption du pétrole lampant par les biocombustibles, où une quantité équivalente à 5% de la masse du combustible est utilisée pour l'allumage. Les briquettes ont totalement absorbé le pétrole lampant, tandis que le charbon de bois l'a partiellement absorbé après la même durée d'imprégnation. Ce taux d'absorption élevé peut s'expliquer par la porosité plus élevée des briquettes combustibles par rapport au charbon de bois car (Anovitz & Cole, 2015) ont rapportés que le taux d'absorption d'un combustible dépend fortement de sa porosité. Les CO<sub>2</sub> émis étaient compris entre  $2 \pm 0,212$  et  $129 \pm 1,41$  g/MJ<sub>délivré</sub> pour les briquettes combustibles et le charbon respectivement. Les tests statistiques de Bravais – Pearson ont montré une forte corrélation entre les émissions polluantes et certaines propriétés des combustibles.

## Remerciements

Ce travail a reçu le soutien financier de l'Agence Française de Développement (AFD) à travers le Centre d'Excellence d'Afrique pour la valorisation des déchets en produits à haute valeur ajoutés (CEA - VALOPRO).

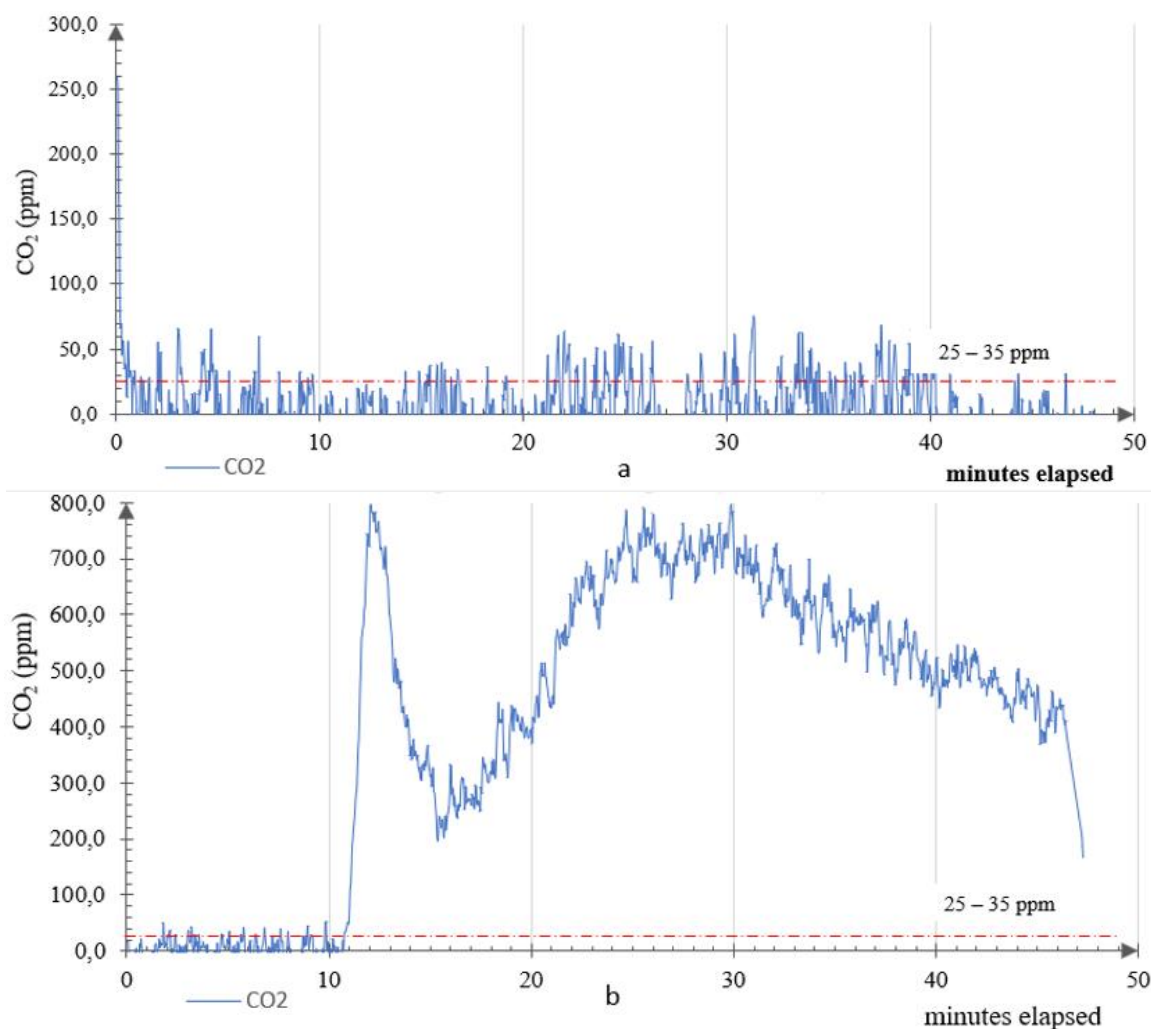


Fig. 2 : Courbes d'émission du dioxyde de carbone

## Références

Ajieh MU, Owebor K, Edomwonyi-Otu LC, Okafor IF (2021) Integration of perennial grass into energy mix as alternative to fuelwood in selected Niger Delta communities, Nigeria. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01570-2>

Anovitz, LM, Cole DR (2015) Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures | *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* | GeoScienceWorld. 80, 61–164. <https://doi.org/10.2138/rmg.2015.80.04>

HEI (2020) State of global air 2020, special report. Health Effects Institute. <https://www.stateofglobalair.org/>

Lai AM, Clark S, Carter E, Shan M, Ni K, Yang X, Baumgartner J, Schauer JJ (2020) Impacts of stove/fuel use and outdoor air pollution on chemical composition of household particulate matter. *Indoor Air*, 30(2), 294–305. <https://doi.org/doi:10.1111/INA.12636>

Piabuo SM, Puatwoe J T (2020) Public health effects of wood fuel in Africa: Bioenergy from tree commodities as a sustainable remedy. In *Public Health in Developing Countries- Challenges and Opportunities*. IntechOpen.

WHO (2014). *World health statistics 2014*. Geneva: World Health Organization. Ice Press. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/112738>.

## Eco-friendly biocomposites: green chemistry approaches for sustainable furniture and thermal insulation

MOHAMMED Wadah<sup>1,2,3</sup>, OSMAN Zeinab<sup>1,2</sup>, ELARABI Salah<sup>3</sup>,  
MEHATS Jérémy<sup>1</sup>, [CHARRIER Bertrand](mailto:Bertrand.charrier@univ-pau.fr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Pau and the Adour Region, E2S UPPA, CNRS, Institute of Analytical Sciences and Physico-Chemistry for the Environment and Materials-Xylomat, (IPREM-UMR5254), Mont de Marsan, 40004, France

<sup>2</sup>Institute of Engineering Research and Materials Technology (IERMT), National Center for Research (NCR), Ministry of Higher Education and Scientific Research, Khartoum, 11111, Sudan

<sup>3</sup>University of Gezira, Faculty of Industries Engineering and Technology, Gezira State, 21111, Sudan  
[Bertrand.charrier@univ-pau.fr](mailto:Bertrand.charrier@univ-pau.fr)

**Key words:** sustainable furniture; eco-friendly bio-insulation; sugarcane bagasse; kenaf bast fibres; cotton stalks; casein, tannins.

### Context and objectives

Biomass residues from agricultural waste, such as crop and wood wastes, straw, and bagasse, have garnered significant attention as a sustainable resource for producing composite materials. These materials offer advantages in cost efficiency, environmental sustainability, and renewability (Saeed et al 2017). Particleboards, commonly used as alternatives to solid wood or plywood, are popular due to their cost-effectiveness and widespread availability (Gumowska et al 2021, Holt et al 2014). In 2020, global particleboard production reached 96.01 million m<sup>3</sup>, and 102 million m<sup>3</sup> in 2023, with China being the largest producer, followed by Germany, Poland, and other European nations (Hua et al 2022). Global market world in 2023 is 24,2 billion USD and expanding at an annual growth of 3.9% during 2024–2032. The market growth is attributed to the high demand for cost-effective and eco-friendly furniture across the globe.

The production process typically involves adhesives like urea-formaldehyde (UF) resin, widely used for its versatile properties in the furniture industry (Baharoğlu et al 2012). However, bio-based adhesives, such as tannin and casein, are gaining attention as eco-friendly alternatives due to their low or zero formaldehyde emissions (Ndiwe et al 2019).

Mechanical and physical properties, such as flexural strength, water absorption, and tensile strength, are crucial for determining composite material applications (Kowaluk, et al 2017). These factors are influenced by the type of adhesive, fibres, and environmental conditions (Chiang et al 2014). Despite the growing demand for particleboards in furniture and construction (Nourbakhsh et al 2010), the carbon footprint of furniture production remains significant, with 47 kg of CO<sub>2</sub> equivalents generated per piece of furniture (Forrest et al 2017). This highlights the need for more sustainable solutions. While bagasse, cotton stalks, and kenaf have shown potential for producing particleboards, challenges remain in developing 100% green composites using natural matrices (Shahril et al 2020).

This study aims to explore the production of fully green particleboards for furniture and thermal insulation in the construction industry, comparing the properties of particleboards made from bagasse, cotton stalk, and kenaf fibres with natural adhesives like tannin and casein.



## Material and methods

### *Materials*

Sugarcane bagasse was sourced from Al-Gunied Sugar Factory in Gezira State, Sudan. Kenaf was grown on the University of Gezira's demonstration farm. Kenaf bast fibres were extracted by peeling the stalks, soaking them in water for one week, then washing and drying them at room temperature. Cotton stalks were collected from the Gezira project. These fibres were used without additional treatments. Mimosa condensed tannin (Acacia) was provided by GREEN'ING Company.

Casein adhesive was sourced from Acros Organics. Hexamethylenetetramine (99%) and sodium bicarbonate were obtained from Fisher Scientific. All products were used as received.

### *Methods*

#### Preparation of Fibres

Sugarcane bagasse was used without further processing, with particle sizes ranging from 10 to 20 mm. Cotton stalks and kenaf bast fibres were manually reduced to match this size and then dried in an oven at 105 °C for 24 hours to achieve a moisture content of 3%.

#### Preparation of Bio-Based Adhesives

A 35% aqueous solution of spray-dried commercial mimosa tannins was prepared, with the pH raised to 9. To this, 6.5% hexamethylenetetramine was added as a hardener. Additionally, a 30% casein solution was mixed with 25% sodium bicarbonate (w/w of casein) as a hardener, using 15% of each adhesive based on the oven-dry weight of the fibres.

#### Preparation and Testing of Particleboards

Particleboards were produced in the laboratory of the Department of Materials Science at the Technical University Institute of the University of Pau, the Adour Region (UPPA). Single-layer particleboards (dimensions: 340×340×20 mm<sup>3</sup>) were created using 15% tannin and casein adhesives. The pressing cycle involved a maximum pressure of 2.5 MPa, with varying pressing times of 60, 120, 240, and 480 seconds, at a temperature of 180 °C. Density profiles were measured using a GreCon DAX 5000 device. The panels were preconditioned at 20 °C and 65% humidity for three days to ensure uniform moisture content before testing. Mechanical properties, including internal bond (IB), modulus of elasticity (MOE), and modulus of rupture (MOR), were assessed following European standards (EN 319 and EN 310). Physical properties such as thickness swelling (TS) and water absorption (WA) were tested according to EN 317, and thermal conductivity was determined following EN 12664.

## Results and discussions

### *Mechanical properties*

Tab. 1 presents the results for modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond (IB), and densities of particleboards made from bagasse, cotton stalks, and kenaf bast fibers, using casein adhesive. Particleboards from bagasse and cotton stalks achieved the highest MOR and MOE values, surpassing EN 312-2 (1996) and EN 312-3 (1996) standards for furniture and interior fitments in dry conditions. These values, though slightly lower than those using treated fibers and synthetic adhesives, are comparable to panels made from bagasse with UF and PMDI adhesives. Casein adhesive offers environmental and cost benefits over synthetic alternatives.

The internal bond strength of bagasse and cotton stalks also met EN standards, demonstrating good mechanical performance at similar densities. However, the kenaf fiber boards showed

poor mechanical properties, failing to meet EN standards. This was likely due to the lower resin-to-fiber ratio and the low initial pressure applied during pressing. To improve kenaf board strength, using the whole kenaf stem instead of just bast fibers is suggested. Overall, casein adhesive shows promise, particularly with bagasse and cotton stalks, for applications like furniture, interior fitting, and insulation.

As shown in Tab. 1, all panels had good thermal conductivity( $\lambda$ ), below the EN standard of 0.12 W/m.K. Bagasse showed a conductivity of 0.082 W/m.K, cotton stalks 0.056 W/m.K and kenaf 0.089 W/m.K. These values are lower than those reported for fenugreek and hemp fibers (Pujari et al 2017), indicating effective heat insulation properties

Tab. 1: Mechanical properties for the panels made from the three fibers and Casein adhesives

Fibres	MOR (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	MOE (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	IB (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	$\lambda$ (W/m. k) <sup>a</sup>
Bagasse	15.6 $\pm$ 0.67	2316 $\pm$ 130	0.39 $\pm$ 0.03	0.082 $\pm$ 0.002
Cotton stalks	14.4 $\pm$ 1.16	2230 $\pm$ 106	0.36 $\pm$ 0.04	0.056 $\pm$ 0.01
Kenaf bast fibers	2.8 $\pm$ 0.55	433 $\pm$ 55	0.07 $\pm$ 0.01	0.089 $\pm$ 0.007
Standard value	EN 310: 11 N/mm <sup>2</sup>	EN 310: 1600 N/mm <sup>2</sup>	EN 319: 0.35 N/mm <sup>2</sup>	EN 12664: 0.12 W/m.k

<sup>a</sup> Values are means  $\pm$  SD.

### *Physical properties*

Tab. 2 shows the thickness swelling (TS) and water absorption (WA) results for particleboards made from bagasse, cotton stalks, and kenaf bast fibres using casein adhesive after 24 hours of water immersion. The TS values for bagasse (14.4%) and cotton stalks (19.3%) slightly higher than the EN 312-3 (14%) value recommended for non-load-bearing boards in humid conditions. Kenaf fibre boards showed a significantly higher TS at 70.9%, which was expected due to the poor quality of adhesion between the fibres. WA values for bagasse, cotton stalks, and kenaf boards were 75%, 96.3%, and 192%, respectively. Differences in water absorption among the fibres can be attributed to variations in fibre type, adhesive, panel density, and manufacturing process. Overall, casein-based particleboards are more suitable for interior applications due to their tendency to swell and absorb moisture.

### *Tannin-based particleboards*

#### Mechanical properties

Tab. 3 presents the MOR, MOE, and IB values for tannin-based particleboards made from three fibers. The MOR and MOE values were lower than those of casein-based boards and did not meet the EN 312-2 (1996) and EN 312-3 (1996) standards. This may be due to the acidic pH (pH 5) of the fibers, which affected the curing of tannins, typically cured at alkaline pH, leading to weaker mechanical properties. Osman et al (2009) previously reported this issue. Although the tannin adhesive pH was raised to 9, it auto condensed at room temperature, complicating application.

Tab. 2: Thickness swelling and water absorption for casein adhesive particleboards.

Fibres	WA (%) 24ha	TS (%) 2ha	TS (%) 24ha	Density (kg/m <sup>3</sup> ) a
Bagasse	118 $\pm$ 14	8.9 $\pm$ 2.5	14.4 $\pm$ 4.36	613.75 $\pm$ 11.90
Cotton stalks	137 $\pm$ 13.5	9.3 $\pm$ 2.7	19.3 $\pm$ 3.92	606.25 $\pm$ 17.64
Kenaf bast fiber	214 $\pm$ 19.38	50.6 $\pm$ 3.66	70.9 $\pm$ 7.3	627.1 $\pm$ 24.21

Values are means  $\pm$  SD.

The thermal conductivity results (Tab. 3) for tannin-based particleboards made from bagasse, kenaf bast fibers, and cotton stalks were all below the EN standard of 0.12 W/m.K, making them suitable for insulation applications. These values suggest that the panels are a viable, healthier alternative to conventional insulation materials (Liu et al 2012).

Tab. 3: Mechanical properties for the panel are made from the three fibers and the tannins.

Fibres	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	IB (N/mm <sup>2</sup> )	$\lambda$ (W/m. k) <sup>a</sup>
Bagasse	8.8 ± 0.45	1263 ± 95	0.22 ± 0.07	0.057 ± 0.009
Cotton stalks	8.4 ± 0.77	1401 ± 117	0.21 ± 0.04	0.050 ± 0.012
Kenaf bast fibre	1.6 ± 0.29	577 ± 102	0.04 ± 0.35	0.083 ± 0.005
Standard value	EN 312:2: 11 N/mm <sup>2</sup>	EN 312:2: 1600 N/mm <sup>2</sup>	EN 312:2: 0.35 N/mm <sup>2</sup>	EN 12664: 0.12 W/m. k

a Values are means ± SD.

### Physical properties

Tab. 4 shows the TS and WA results for tannin-based particleboards. The TS values for cotton stalk and bagasse met EN 312:3 standards, while kenaf bast fibers recorded the highest value, though lower than when used with casein adhesive. All panels exhibited high water absorption due to the hydrophilic nature of cellulosic fibers, which reduces moisture resistance (Sahu et al 2022). The internal bond strength (IB) also influences physical properties, as stronger bonds reduce panel porosity, improving water resistance, as noted by Paridah et al 2014. Tannin-based boards demonstrated better physical properties compared to casein-based ones, likely due to tannin's higher water resistance and differences in board density.

Tab. 4: Water absorption and thickness swelling for tannin particleboards.

Fibres	WA (%) 24ha	TS (%) 24ha	Density (kg/m <sup>3</sup> ) a
Bagasse	110.3 ± 13	7.4 ± 3.5	633.75 ± 15.70
Cotton stalks	115.3 ± 14.5	10.3 ± 3.3	616.25 ± 19.31
Kenaf bast fibers	193.1 ± 17	48.6 ± 5.9	657.10 ± 31.46
Standard	EN 312:3 =14%		

Values are means ± SD.

### **Conclusion and perspectives.**

The study examined the mechanical, physical, and thermal properties of particleboards made from bagasse, cotton stalks, and kenaf bast fibers using casein and tannin adhesives. Key findings include:

- The production of 100% green and sustainable panels from bagasse and cotton stalks met European standards for furniture, thermal insulation, and interior applications, without fiber pretreatment.
- Kenaf bast fibers' light weight and larger volume resulted in panels with inferior mechanical properties.
- Casein adhesive outperformed tannins in mechanical properties, with higher modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond (IB) values. Tannin adhesives are more effective in alkaline conditions, suggesting a need to adjust the fiber's acidic pH to prevent auto-condensation.
- Whole stalks of kenaf may improve mechanical properties and will be explored in future research.

- Both casein and tannin particleboards satisfied EN 12664 thermal conductivity standards, confirming their potential for bio-insulation materials.

### Acknowledgements

This research study has been jointly funded by the Ministry of Higher Education and Scientific Research, Sudan, and Institute of Analytical Sciences and Physico-Chemistry for the Environment and Materials-Xylomat, (IPREM-UMR5254), <sup>1</sup>University of Pau and the Adour Region, E2S UPPA, CNRS France.

### References

- Saeed HAM, Liu Y, Lucia LA, Chen H (2017) Evaluation of Sudanese sorghum and bagasse as a pulp and paper feedstock. *BioResources*, 12(3), 5212–5222.2.
- Gumowska A, Robles E, Kowaluk G (2021) Evaluation of functional features of lignocellulosic particle composites containing biopolymer binders. *Materials*, 14(24), 7718.
- Holt GA, Chow P, Wanjura JD, Pelletier GM, Wedegaertner TC (2014) Evaluation of thermal treatments to improve physical and mechanical properties of bio-composites made from cotton byproducts and other agricultural fibers. *Industrial Crops and Products*, 52, 627–632.
- Hua LS, Chen LW, Geng BJ, et al (2022) Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 100310.
- Baharoğlu M, Nemli G, Sari B, Bardak S, Ayırlmış N (2012) The influence of moisture content of raw material on the physical and mechanical properties, surface roughness, wettability, and formaldehyde emission of particleboard composite. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2448–2451.
- Ndiwe B, Pizzi A, Danwe R, Tibi B, et al (2019) Particleboard bonded with bio-hardeners of tannin adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(6), 1221–1223.
- Kowaluk G, Zajac M, Czubak F, Auriga R (2017) Physical and mechanical properties of particleboards manufactured using charcoal as additives. *iForest*, 10(1), 70–74.
- Chiang TC, Osman MS, Hamdan S (2014) Water absorption and thickness swelling behavior of sago particles urea formaldehyde particleboard. *International Journal of Science Research*, 3(12), 1375–1379.
- Nourbakhsh A (2010) Mechanical and thickness swelling of particleboard composites made from three-year-old poplar clones. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(4), 481–489.
- Forrest A, Hilton M, Ballinger A, Whittaker D (2017) Circular economy opportunities in the furniture sector. Report produced for the European Environment Bureau (EEB).
- Shahril S, Mohammad A, Anuar BS, Oskar H (2020) A conceptual framework of design and material process of bagasse for furniture application. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 5, 10.21834/ebpj.v5iSI1.2304.
- Pujari S, Venkatesh T, Seeli H (2017) Experimental investigations on thermal conductivity of fenugreek and banana composites. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0146-z>.

Osman Z, Pizzi A, Alamin IH (2009) Comparative properties of agrofiber-based particleboards using newly developed bonding materials. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3(3), 275–281.

Sahu P, Gupta M (2022) Water absorption behavior of cellulosic fibers polymer composites: A review on its effects and remedies. *Journal of Industrial Textiles*, 51(5\_suppl), 7480S–7512S. <https://doi.org/10.1177/152808372097442449>.

Paridah MT, Juliana AH, El-Shekeil YA, Jawai M, Alothman OY (2014) Measurement of mechanical and physical properties of particleboard by hybridization of kenaf with rubberwood particles. *Measurement, Journal of the International Measurement Confederation*, 56, 70–80.

Liu DT, Xia KF, Yang RD, Li J, Chen KF, Nazhad MM (2012) Manufacturing of a biocomposite with both thermal and acoustic properties. *Journal of Composite Materials*, 46(9), 1011–1020.

## De l'utilisation de la colophane comme adhésif pour panneaux de particules

LACOSTE Clément<sup>1</sup>, VIRETTO Amandine<sup>2,3</sup>, RIO Samy<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UPR PCH, IMT Mines Ales, Alès, France

<sup>2</sup>CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

<sup>3</sup>BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

<sup>4</sup>Studio Rio, Arles, France

[clement.lacoste@mines-ales.fr](mailto:clement.lacoste@mines-ales.fr)

**Mots clés :** panneaux bois ; biopolymère ; adhésion ; gemme ; pin maritime

### Contexte et objectifs

La préoccupation mondiale concernant l'épuisement des ressources fossiles, l'augmentation progressive des déchets et de l'empreinte carbone des produits manufacturés ont accru l'intérêt pour l'utilisation de nouvelles matières biosourcées et durables pour élaborer des biomatériaux. Le secteur des panneaux bois a connu une forte croissance ces dernières années dans toute l'Europe et la recherche de solutions nouvelles pour des colles biosourcées, moins nocives et sans formaldéhyde, adaptées aux procédés de mise en forme industriels et répondant aux exigences normatives pour les usages des panneaux constitue un enjeu majeur.

En France, la filière bois se concentre majoritairement sur l'exploitation des bois de résineux dans tous les secteurs d'applications de la filière (construction, ameublement, etc...). A l'instar du bois, les cônes ou la résine de ces essences peuvent également trouver des voies de valorisation et constituer une activité complémentaire pour les sylviculteurs. Dans les Landes au 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècle, le gemmage, qui consiste à récolter de la résine des pins à l'aide d'une incision réalisée sur l'écorce des arbres, est une pratique très importante (Bousseau 2021, Chadda et al 2020). Cependant, avec la concurrence d'autres pays producteurs comme la Chine et l'Indonésie, cette activité a fortement chuté dans les années 90 (Bousseau 2021). Aujourd'hui, la recherche de solutions de valorisation pour des applications à plus forte valeur ajoutée et représentant des volumes importants comme l'industrie des panneaux pourrait favoriser l'essor d'une filière locale autour du gemmage vers un modèle de bioéconomie.

La résine de pin, ou gemme, est constituée de deux composants majoritaires, en fraction massique moyenne de 70 % de colophane et 30 % d'essence de térébenthine (Fig. 1) qui peuvent être séparées après une étape de distillation.



Fig.1 : Produits issus du gemmage de pin maritime

Si l'essence de térébenthine trouve des applications dans divers secteurs industriels tels que la parfumerie, la pharmacie et le secteur agroalimentaire, la colophane brute est peu utilisée (car sujette à l'oxydation) et est souvent modifiée chimiquement pour ses applications. Employée dans des applications dans divers secteurs tels que les encres et vernis, adhésifs, lubrifiants, l'ensimage papier, celle-ci manque de valorisation dans la filière bois avec une production qui

reste marginale en France malgré quelques programmes de relance de production tels que le programme BioGemme de la société Holiste dans les Landes avec une production d'environ 60 t/an, un programme dans la région Grand Est (Clopeau et Orazino 2021) et, plus récemment, une expérimentation dans la forêt cévenole (Bousseau 2021).

La colophane est composée à 90 % d'acides résiniques de formule brute  $C_{20}H_{30}O_2$  dont majoritairement des acides abiétique et pimarique (Fig. 2), et de 10 % d'esters, d'aldéhydes et de cétones. Cette composition moyenne peut varier en fonction de facteurs inter-espèces (essences), morphologiques (diamètre du tronc, proportion de couronne), ou encore pédoclimatiques (température, sols, stress hydrique...) (Lopez-Alvarez et al 2023).

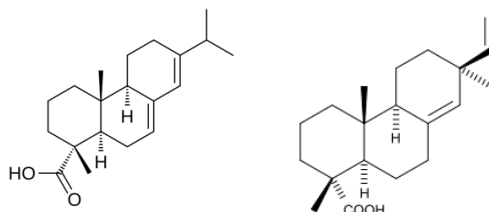


Fig. 2 : Structure chimique de l'acide abiétique (gauche) et pimarique (droite)

La colophane, solide à température ambiante, est un thermoplastique sans toxicité et insoluble dans l'eau avec un point de ramollissement entre 90°C et 110°C selon sa composition, et possède une capacité à former des liaisons ioniques avec la matière organique (Wilson et al 2021). Ses propriétés adhésives et hydrophobes présentent un intérêt pour une utilisation en tant qu'adhésif pour le bois et les panneaux bois. Son caractère biosourcé et biodégradable en fait également un bon candidat pour la substitution des colles pétrosourcés (urée-formaldéhyde, phénol-formaldéhyde, isocyanates...) de l'industrie des panneaux.

La présente étude vise à développer un panneau de particules à partir de copeaux de bois de différentes essences et de différentes granulométries en utilisant de la colophane en poudre comme liant. Un procédé de mise en forme par thermocompression à sec a été développé spécifiquement pour la mise en forme des panneaux. Des premiers essais de caractérisations des propriétés mécaniques (flexion, résistance aux chocs) et thermiques (conductivité) ont été réalisés en vue d'un usage en milieu intérieur.

## Matériels et méthodes

### Matériaux utilisés

La colophane a été fournie par la société Biolandes (France) sous le nom commercial Biogemmes® et a été réduite en poudre manuellement à l'aide d'un mortier.

Trois types de copeaux bois ont été utilisés (Fig. 3) : *i*) des fibres de bois de résineux (mélange d'essences) fournis par Silvadec (France) noté F, *ii*) des copeaux de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) issus de dégauchisseuse noté A, et *iii*) des copeaux de résineux (mélange d'essences) issus de scie circulaire noté R. Un panneau de particules commercial a été utilisé comme référence.

### Granulométrie

Les granulométries des 3 lots de copeaux bruts ont été analysés par tamisage en utilisant 11 tamis sur une plage de 4 mm à 0,2 mm empilés par ordre décroissant : 4 mm / 3,15 mm / 2,5 mm / 1,6 mm / 1 mm / 0,71 mm / 0,6 mm / 0,5 mm / 0,4 mm / 0,3 mm / 0,2 mm.

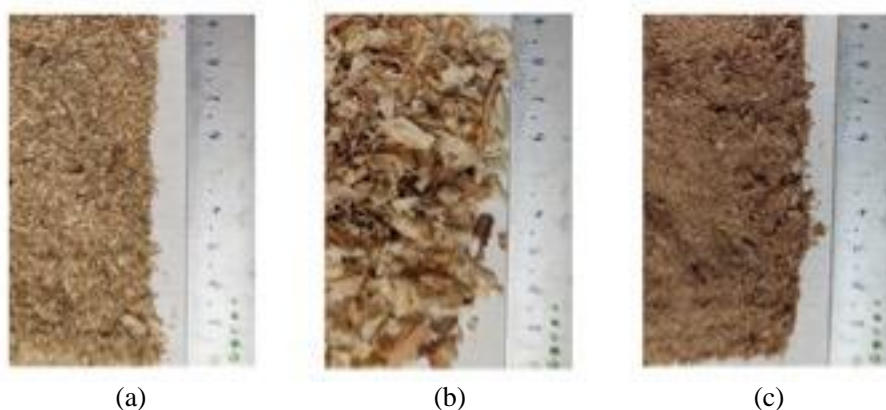





Fig. 3 : Copeaux de bois utilisés comme renfort: (a) fibres courtes de mélange résineux ; (b) copeaux de pin d'Alep issu de dégauchisseuse ; (c) mélange de résineux issus de scie circulaire.

#### Fabrication des panneaux de particules

La colophane a été réduite en poudre afin d'homogénéiser la distribution poudre/copeaux pour la formation d'un mélange à sec homogène. La poudre de colophane (8 - 20%) et les copeaux (80 - 92%) ont été mélangés par agitation dans un sac plastique étanche jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Le mélange est alors déposé dans un moule en acier de section 10 x 10 cm<sup>2</sup> ou 30 x 30 cm<sup>2</sup> et 10 mm d'épaisseur puis compresser à 5 bars à une température de 130 °C pendant 20 min de manière continue à l'aide d'une presse hydraulique chauffante 100 T (DARRAGON, France). Les quantités des mélanges ont été adaptés en visant une masse volumique cible fixée à 750 kg.m<sup>-3</sup>. Après démoulage, les panneaux sont stockés en chambre climatique à 20 °C et 50 % d'humidité relative (HR) avant les tests.

Les formulations des panneaux sont résumées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Formulation des panneaux de copeaux bois/colophane

Nomenclature du panneau	Type de renfort – section du moule	Aspect
P_F	F (fibres courtes mélange résineux)	
P_A	A (copeaux pin d'Alep)	
P_R	R (copeaux mélange résineux)	

#### Masses volumiques et porosité

La masse volumique apparente ( $\rho_a$ ) des panneaux a été mesurée selon la norme EN 323 à 20°C et 50% HR et calculée selon l'équation (1) :

$$\rho_a = m/V \quad (1)$$

avec m la masse de l'échantillon et V le volume du parallélépipède mesuré à l'aide d'un pied à coulisse (précision 0,01 mm). Un pycnomètre à hélium (AccuPyc 1330 Micrometrics, France)



a été utilisé pour déterminer la masse volumique vraie ( $\rho_s$ ) des panneaux (en triplicata). La porosité a été déterminée à partir de l'équation (2) :

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (2)$$

### Conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique des panneaux a été réalisée à partir d'un conductivimètre FP2C (NEOTIM, France) à fil chaud (50 mm) pendant 100 s à 120 s sous une puissance de 0,07 à 0,09 W selon la masse volumique de l'échantillon.

### Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques en flexion, *ie* les modules élastiques (MOE) et résistance à rupture (MOR), ont été déterminées selon la norme EN 310 sur une presse universelle (Zwick/Roell, Allemagne) équipée avec une cellule de force de 10 kN en appliquant une vitesse de déformation de 10 mm/min. La résistance à l'impact Charpy a été évaluée sur des barreaux non entaillés de 10 cm x 1 cm et d'environ 1 cm d'épaisseur à l'aide d'un mouton pendule HIT5P (Zwick/Roell, Allemagne), instrumenté d'un marteau 0,5 J.

### Résultats et discussion

Les copeaux utilisés possèdent des granulométries assez différentes pour chaque lot. Le lot R est relativement fin avec une granulométrie centrée sur 0,5 mm (74 wt.%). Le lot F possède une granulométrie intermédiaire avec une taille comprise entre 0,5 et 1,6 mm. Le lot A est plus grossier avec une granulométrie supérieure à 1,6 mm (78 wt.%). Ces derniers ont donc nécessité une compaction plus importante pour le moulage.

Les panneaux obtenus semblent relativement homogènes en épaisseur avec néanmoins la présence de tâches sur les faces montrant une répartition hétérogène du liant. Une étude plus approfondie sur la viscosité et le mouillage des copeaux par la colophane serait donc à envisager pour optimiser les propriétés des panneaux.

Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des panneaux obtenus sont reportées dans le Tab. 2.

Tab. 2 : Propriétés des panneaux bois/colophane

Formulations	Densité apparente ( $kg.m^{-3}$ )	Densité vraie ( $kg.m^{-3}$ )	Porosité (%)	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Résistance Choc ( $kJ/m^2$ )
Référence commerciale	695 - 745	1389 $\pm$ 1	46 - 50	0,17	2763 $\pm$ 106	15,8 $\pm$ 1,0	2,55 $\pm$ 0,72
P_F	550 - 910	1271 $\pm$ 2	28 - 59	0,14 - 0,19	4535 $\pm$ 449	9,1 $\pm$ 2,1	0,35 $\pm$ 0,04
P_A	420 - 768	1299 $\pm$ 1	41 - 68	0,092	1437 $\pm$ 442	4,1 $\pm$ 0,6	1,49 $\pm$ 0,22
P_R	540 - 730	1367 $\pm$ 4	47 - 60	0,12-0,15	1645 $\pm$ 383	4,2 $\pm$ 1,3	0,56 $\pm$ 0,07

La conductivité thermique suit une relation linéaire avec la masse volumique apparente des panneaux. Les panneaux les plus denses, avec une masse volumique supérieure à 700  $kg.m^{-3}$  voient leur conductivité dépasser les 0,1 W/m/K et ne peuvent donc plus être considérés comme isolant. Le panneau de copeaux de pin d'Alep, comportant des copeaux plus grossiers, est le panneau le plus poreux et donc le plus isolant avec une conductivité thermique de 0,092 W/m/K. La porosité intrinsèque des copeaux peut donc légèrement influencer les conductivités des panneaux de densités équivalentes.

Les propriétés mécaniques montrent que les panneaux à base de colophane sont plus souples que la référence commerciale, avec des modules élastiques inférieurs et des résistances en flexion et au choc moindres, excepté pour le panneau P\_F de haute masse volumique. En effet, ce panneau très compact montre une très haute rigidité avec un module à  $4535 \pm 449$  MPa et une résistance en flexion de  $9,1 \pm 2,1$  MPa, ce qui est proche des exigences de la norme NF EN 312 pour les panneaux d'usage intérieur.

Par ailleurs, l'utilisation de copeaux de plus grandes longueurs permet d'améliorer significativement la résistance au choc des panneaux de colophane, avec une valeur mesurée à  $1,49 \pm 0,22$  kJ/m<sup>2</sup> pour le panneau P\_A contre  $0,35 \pm 0,04$  kJ/m<sup>2</sup> pour le panneau P\_F.

### Conclusion et perspectives

Différentes formulations ont été mis en œuvre pour obtenir des panneaux de particules entièrement biosourcés à partir de produits locaux et non toxiques, et de biomasses résiduelles disponibles. Bien que les propriétés mécaniques de ces premiers panneaux restent inférieures à celles des panneaux commerciaux, ces premiers résultats sont encourageants. Les axes d'amélioration sont nombreux et atteignables comme notamment le procédé de mise en œuvre qui permettra, après optimisation par plan d'expérience, de concurrencer les panneaux traditionnels collés à partir de polymères synthétiques, pétrosourcés et non biodégradables. Une meilleure connaissance des propriétés thermomécaniques de la colophane et de son adhésion sur les fibres lignocellulosiques permettrait d'élaborer de nouveaux produits bois d'ingénierie. Cette nouvelle voie de valorisation sera poursuivie dans le cadre d'un projet structurant en Cévennes visant au déploiement d'une micro-filière de gemmage.

### Remerciements

Les auteurs remercient la société Holliste, et les menuiseries « Bois et via » et « Pesin » pour la fourniture des matières premières. Les auteurs remercient chaleureusement les étudiants Elie Cheynel, Fanny Malatier et Pierre Sudre du Master Science du Bois de l'Université de Montpellier et les étudiants Adrien Duvacher et Léa Grison de l'IMT Mines Ales pour leurs investissements et diverses contributions sur les parties expérimentales.

### Références

- Bousseau B (2021). Etude économique de faisabilité pour la création d'une micro-filière de gemmage en Cévennes (p. 30). CERIBOIS.
- Chadda S, Herlidou A, Le Nouvel L (2020). Pré-étude de faisabilité pour la création d'une micro-filière PPAM à usage thermal et non thermal, à base de pin maritime cévenol (p. 42).
- Clopeau A, Orazino C (2021). Analyse du secteur européen de la résine naturelle à travers sa chaîne de valeur. Rapport technique, Projet SUDFOREST.
- Lopez-Alvarez O, Zas R, Marey-Perez M (2023). Resin tapping: a review of the main factors modulating pine resin yield. *Ind Crops Prod* 202, 117105.
- Wilson M, Perrone A, Smith H, Norris D, Pargeter J, Eren M I (2021). Modern thermoplastic (hot glue) versus organic-based adhesives and haft bond failure rate in experimental prehistoric ballistics. *Inter J Adhes Adhes*, 104, 102717.

## Impact de la longueur déroulée sur les efforts appliqués par la barre de pression en micro-déroulage

CURIAL Hugo<sup>1</sup>, DENAUD Louis<sup>1</sup>, VIGUIER Joffrey<sup>1</sup>, MARCON Bertrand<sup>1</sup>  
VERJAT Fabrice<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers Institute of Technology, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté,  
[Hugo.Curial@ensam.eu](mailto:Hugo.Curial@ensam.eu)

**Mots clés :** bois feuillus ; micro-dérouleuse expérimentale ; visualisation de la coupe ; effet de bord ; coupe orthogonale

### Contexte et objectif

Le secteur de la construction en bois fait actuellement essentiellement appel à des bois de résineux, dont la production nationale est largement inférieure aux besoins. En conséquence, la majeure partie du bois utilisé en construction est importé, ce qui contribue fortement au déficit de la balance commerciale qui s'accroît (7,1 milliards d'euros de déficit commercial en 2020 et 8,6 milliards d'euros en 2021 selon (Agreste 2022)). La forêt française étant composée à plus de deux tiers de feuillus, l'inadéquation entre la ressource et les besoins en construction (essentiellement résineux) explique pour partie ce déficit commercial.

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre d'une thèse sur la valorisation des bois feuillus dans le domaine de la construction (structure et agencement notamment). Le procédé de déroulage permet la fabrication de produits répondant à ces différents secteurs. C'est un procédé de première transformation du bois au cours duquel un billon de bois est entraîné en rotation devant un couteau (Fig. 1). Ce couteau est animé d'un mouvement de translation en direction du centre du billon de bois avec une avance par tour correspondant à l'épaisseur du placage (feuille de bois issue de la coupe) souhaitée. Ces mouvements combinés produisent un ruban continu. L'objectif industriel de cette thèse vise donc à caractériser l'aptitude au déroulage et les qualités des produits du déroulage (placages et produits collés) pour des essences feuillues dites secondaires pour lesquels les arbres sont souvent plus petits et de moins bonne conformation. Cette thèse, bien qu'ancrée dans un projet ayant des objectifs industriels, offre également une opportunité d'explorer des aspects scientifiques plus fondamentaux. En effet, elle permettra d'approfondir la compréhension des paramètres du procédé de déroulage, un domaine clé pour l'optimisation des performances industrielles.

Pour réaliser ces travaux, une machine de déroulage expérimentale, appelée micro-dérouleuse, disponible au LaBoMaP permet le déroulage de disque de bois de 15 à 40 mm de longueur (Fig. 2). Un important travail de remise en service a été réalisé durant la première partie de ces travaux et un nouveau système de visualisation de la coupe a été installé. La machine ainsi que les nouveaux systèmes ajoutés sont présentés dans la partie matériel et méthode. L'effet du changement de longueur déroulée (40mm contre 800mm dans la dérouleuse industrielle du LaBoMaP) sur les efforts de coupe et sur la barre de pression n'a cependant jamais été quantifié. La campagne d'essai visant à évaluer les effets de ce changement dimensionnel est présentée pour valider le dispositif expérimental. L'effet principal supposé est une diminution des efforts sur la barre de pression, car la majorité de l'eau libre est éjectée dans le sens longitudinal lors d'un essai de micro-déroulage alors que celle-ci ne peut avoir lieu lors du déroulage en pleine longueur. L'évolution des efforts en déroulage pour plusieurs longueurs de disques est donc ici

étudiée afin de quantifier l'influence des effets de bord sur les mesures effectuées à l'aide de la dérouleuse expérimentale.

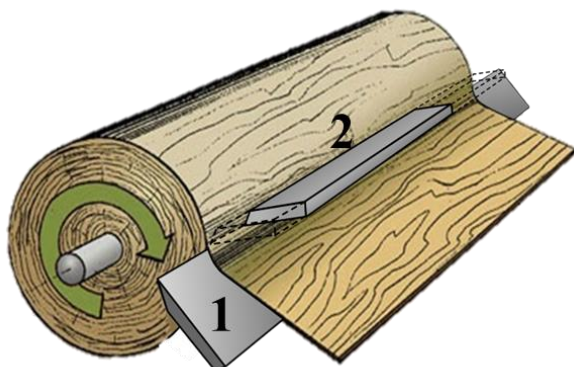


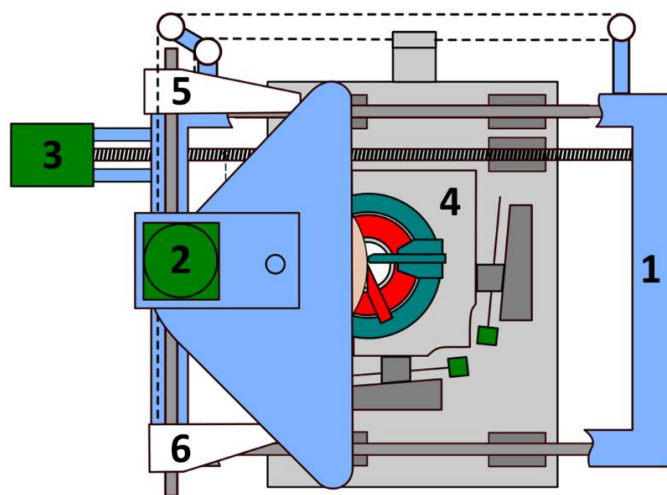
Fig. 1 : Schéma de principe de déroulage présentant les deux outils du déroulage. 1, couteau. 2, barre de pression.



Fig. 2 : Micro-dérouleuse expérimentale, (J-C Butaud, 1996)

## Matériel et méthodes

La dérouleuse expérimentale ou micro-dérouleuse (Fig. 3) a été conçue par Jean-Claude Butaud (Butaud J-C 1994) avec l'impulsion de Rémy Marchal en 1996 au LaBoMaP et a servi depuis à réaliser plusieurs études sur les phénomènes de déroulage (Decès-Petit 1996, Denaud 2006).



1.	Bâti machine
2.	Moteur de broche
3.	Moteur d'avance
4.	Chariot porte-outil avec en rouge le porte-couteau et le couteau et en vert le porte-barre et la barre de pression
5.	Support de profilomètre
6.	Support du patin de frottement

Fig. 3 : Architecture de la micro-dérouleuse expérimentale

On retrouve sur la micro-dérouleuse un moteur électrique couplé à un réducteur qui entraîne un disque de bois. À la différence d'une machine de production, celle-ci n'est pas prise entre deux broches motorisées, mais est pressée contre une broche unique à l'aide d'une tige filetée la traversant. Le chariot porte outils est lui piloté par un moteur brushless asservi en fonction de la rotation de la broche et de l'avance par tour spécifiée (correspondant à l'épaisseur de placage souhaitée). Le couteau, dont on peut faire varier l'angle de dépouille est solidaire du chariot porte outil et la barre de pression (voir Fig. 4 pour la correspondance des outils et des réglages) peut être déplacée en rotation ainsi que verticalement et horizontalement par rapport au couteau

pour ajuster la position relative des deux outils. Les différents réglages sont pilotés par l'automate de la machine. Les capacités de cette dernière sont résumées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Capacité de la micro-dérouleuse

	Amplitudes
Longueur du disque	5 à 40mm
Diamètre du disque	25 à 500 mm
Epaisseur des placages	0.1 à 5mm
Vitesse de coupe (vitesse du ruban)	0.03 à 3 m/s
Angle de dépouille	$\pm 40^\circ$
Angle de la barre de pression	$\pm 20^\circ$
Cote verticale	0 à 7mm
Cote horizontale	0 à 8mm

Le porte-barre, le porte-couteau et le patin de frottement sont montés sur des cellules triaxiales piézoélectriques Kistler 9067 qui permettent de mesurer les efforts sur les différents outils ainsi que le coefficient de frottement local de l'acier sur le bois. Un profilomètre Keyence LJ-V7080 se déplace de manière radiale par rapport à la broche de la même manière que le chariot porte outil. Il mesure la distance moyenne ce qui permet le calcul de l'épaisseur coupée.

En parallèle de la mesure des efforts, la zone de coupe est filmée à l'aide d'une caméra pour l'observation de la coupe à environ 1000 image/s. L'acquisition simultanée des efforts et des images de la coupe permet d'observer l'apparition de certains phénomènes pendant la coupe et de mesurer leur impact sur les efforts de coupe.

Enfin, une méthode de correction des efforts mesurés par compensation dynamique (Girardinet al 2010, Scippa et al 2015) du comportement vibratoire de la machine est en train d'être mise en place pour limiter les perturbations dues à la résonance de la machine entre 538 et 576 Hz (Denaud 2006) interférant avec les efforts générés par la fissuration à certaines vitesses de coupe. Cette méthode a déjà été utilisée par pour l'usinage du bois en coupe orthogonale sur des platines de mesure Kistler.

Le peuplier ayant un des taux d'humidité très important (100% dans l'aubier et jusqu'à 250% dans le faux-cœur (Heim 2023), cette essence a été choisie afin de caractériser l'effet de la longueur sur les efforts mesurées (hypothèses d'une éjection de l'eau favorisée par cette faible longueur en comparaison des longueurs déroulées sur des dérouleuses industrielles). Les réglages géométriques ne sont pas l'objet de cette étude aussi, un jeu unique de réglages cohérent avec les usages du laboratoire a été défini (Curti 2018) pour tous les essais (Fig. 4). La longueur des disques déroulés (15, 25, 35 mm) s'échelonne sur l'amplitude acceptable par la machine (Tab. 1). 4 rondelles par longueur ont été déroulées entre 120 et 110mm de rayon. Le coincement de particules de bois et la rupture d'une rondelle ont empêchés le bon déroulement de 4 essais. Les résultats correspondant à ces rondelles ne sont donc pas présentés.

Les efforts sont mesurés dans un repère horizontal-vertical (H, V sur la Fig. 4) sur le couteau et la barre de pression. Ils sont nommés respectivement : Hcouteau, Vcouteau, Hbarre et Vbarre et représentent l'effort appliqué par l'outil sur le bois. Seuls les efforts sur la barre de pression sont considérés ici.

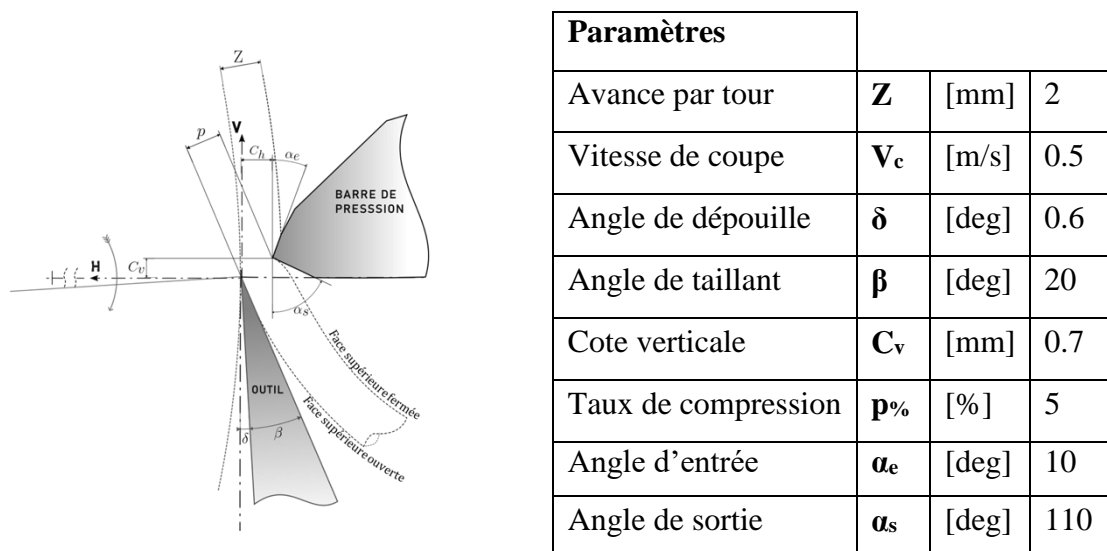


Fig. 4 : Géométries des outils du déroulage et paramètres géométriques pour la campagne

## Résultats et conclusions

Les résultats de la mesure des efforts horizontaux sont présentés en Fig. 5. Il apparaît que dans la gamme testée, la longueur n'a pas d'influence significative sur l'effort linéique horizontal sur la barre de pression. Aucune influence n'est visible non plus sur les efforts verticaux sur la barre de pression.

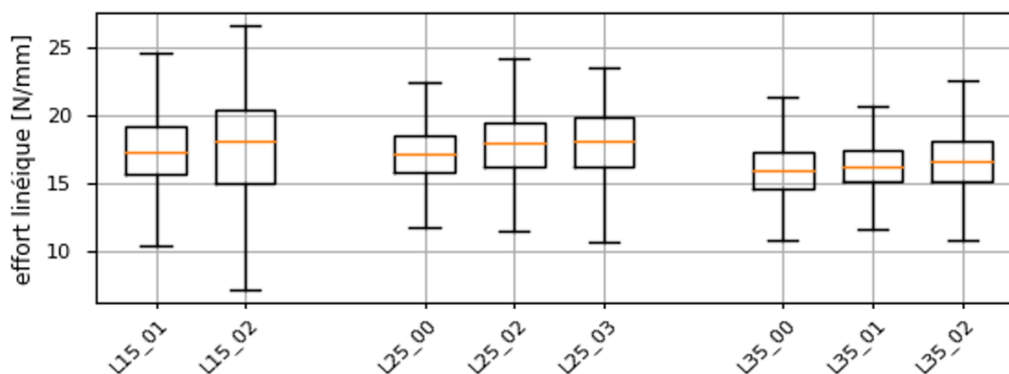


Fig. 5 : Boxplots de l'effort linéique pour les trois séries de largeurs

Ces essais devront être complétés par la mesure des efforts pour des disques de bois totalement saturés en eau par un trempage prolongé. Ceci déterminera si la teneur en eau libre à une influence sur les efforts dans la gamme de longueur déroulée sur la micro-dérouleuse.

## Remerciements

Ces travaux sont soutenus financièrement par l'ADEME au travers du projet Feuillus CHOC porté par le FCBA.

## Références

Butaud JC (1994) Conception d'une dérouleuse instrumentée, Mémoire de diplôme ingénieur CNAM, CNAM, Cluny (FR), 76 p.

Curti R (2018) Analyse, modélisation et simulation de la coupe orthogonale du bois vert en vue de son application au fraisage par canter, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Cluny (FR), p. 68-73.

Decès-Petit C (1996) Etude des phases transitoires au cours du déroulage du bois, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Cluny (FR), 122 p.

Denaud L (2006) Analyses vibratoires et acoustiques du déroulage, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Cluny (FR), p. 117.

Girardin F, Remond D, Rigal JF (2010) High Frequency Correction of Dynamometer for Cutting Force Observation in Milling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132 (3) : 031002, <https://doi.org/10.1115/1.4001538>.

Scippa A, Sallese L, Grossi N, Campatelli G (2015) Improved Dynamic Compensation for Accurate Cutting Force Measurements in Milling Applications, *Mechanical Systems and Signal Processing* 54-55, 314-24. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.08.019>.

## Influence des algorithmes de traitement de l'effet trachéide sur les propriétés extraites

BOIVIN Juliette<sup>1</sup>, TEYSSIEUX Damien<sup>2</sup>, GIRARDON Stéphane<sup>1</sup>, DENAUD Louis<sup>1</sup>,  
FROEHLI Luc<sup>2</sup>, COTTIN Fabrice<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, F-71250 Cluny, France

[Juliette.Boivin@ensam.eu](mailto:Juliette.Boivin@ensam.eu), [Louis.Denaud@ensam.eu](mailto:Louis.Denaud@ensam.eu), [Stephane.Girardon@ensam.eu](mailto:Stephane.Girardon@ensam.eu),  
[Fabrice.Cottin@ensam.eu](mailto:Fabrice.Cottin@ensam.eu)

<sup>2</sup>Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies (FEMTO – ST) – UMR 6174

[Damien.Teyssieux@femto-st.fr](mailto:Damien.Teyssieux@femto-st.fr), [Luc.Froehly@univ-fcomte.fr](mailto:Luc.Froehly@univ-fcomte.fr)

**Mots clefs :** Traitement d'images ; Effet trachéide ; Lumière ; Optique

### Contexte

Le bois sera l'un des matériaux de construction de base du XXI<sup>ème</sup> siècle. Ses propriétés de légèreté, de rigidité, d'isolation et sa capacité à capturer le carbone font de lui un matériau incontournable dans le contexte actuel, où les préoccupations écologiques sont omniprésentes.

Une de ses particularités réside dans sa structure multi-échelle complexe et hétérogène qui résulte de la croissance adaptative et singulière d'un arbre dans son environnement (Schoch 2004, Trouy 2015). Comme toute ressource issue du vivant, sa variabilité naturelle est très forte et représente un enjeu essentiel dans sa valorisation comme matériau de construction, d'emballage ou d'aménagement intérieur ou extérieur.

Le principal frein à l'utilisation de bois français dans la construction réside dans la difficulté à prédire ses propriétés mécaniques du fait de son hétérogénéité intrinsèque plus forte que celle des bois du nord. En particulier, la construction à partir de bois feuillus, qui représentent plus des deux-tiers de la ressource sur le territoire métropolitain, est aujourd'hui freinée par la complexité à modéliser leur comportement mécanique et un contexte normatif globalement moins complet que celui concernant les résineux.

Le premier paramètre d'hétérogénéité du bois réside dans l'orientation de ses fibres, qui gouverne ses propriétés mécaniques et physiques. La connaissance de cette orientation pour un placage ou un sciage peut améliorer son usage. Aujourd'hui, cette mesure peut être réalisée par des techniques faisant appels à des faisceaux laser par effet trachéide (Briggert 2018, Kienle 2008, Nyström 2003) : lorsqu'un faisceau laser illumine une surface en bois, la lumière est diffusée et conduit à un halo de lumière de forme elliptique dont le grand axe suit les fibres du bois (Fig. 1).

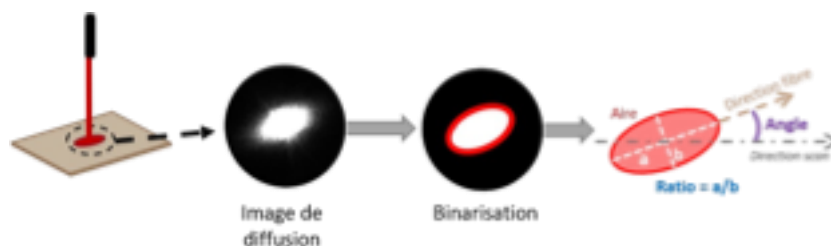


Fig. 1 : Représentation de l'effet trachéide



Après acquisition de l'image de la surface du placage à l'aide d'une caméra, celle-ci est traitée à l'aide de différents algorithmes d'extraction d'ellipse, et des données en sont retirées (grand axe, petit axe, aire, ratio, orientation de l'ellipse).

### Matériel et méthodes

Le douglas a été choisi comme essence de travail en raison de sa microstructure simple et de sa grande différence de densité entre le bois de printemps et le bois d'été. On s'intéresse à deux plans de coupe (LR et LT). Quatre éprouvettes de bois rabotées de taille 5 x 5 cm et d'épaisseur 1 mm ont été utilisées, afin d'obtenir des échantillons témoins de la variabilité au sein de l'essence (Fig. 2).

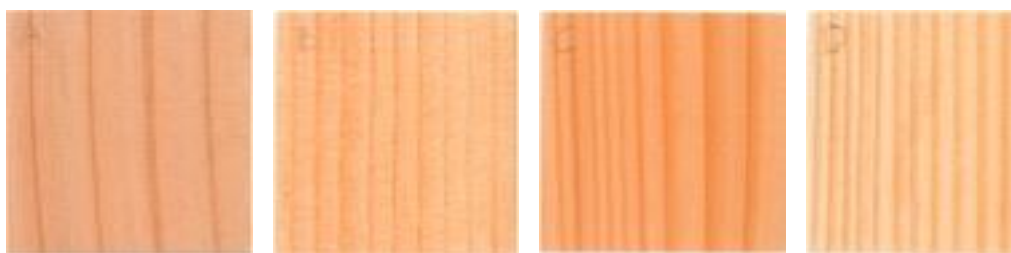


Fig. 2 : Echantillons de douglas

Un montage expérimental présenté sur la Figure 3 a permis de collecter des images d'effet trachéide en transmission.

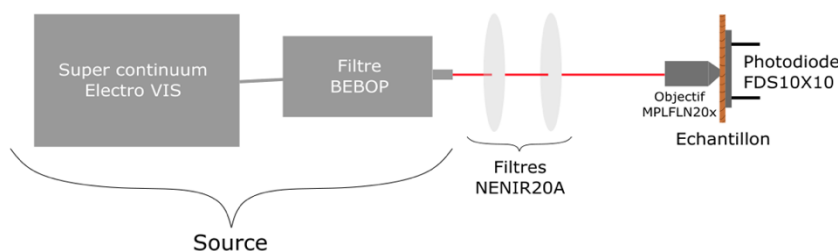


Fig. 3 : Montage expérimental permettant de déterminer la transmittance d'échantillons de bois

Pour chaque échantillon, un scan est effectué sur une zone de 1.5 x 1.5 cm avec un pas de 0.1 mm. En chaque point du scan, une image avec trois temps d'exposition différents est capturée (Fig. 4).

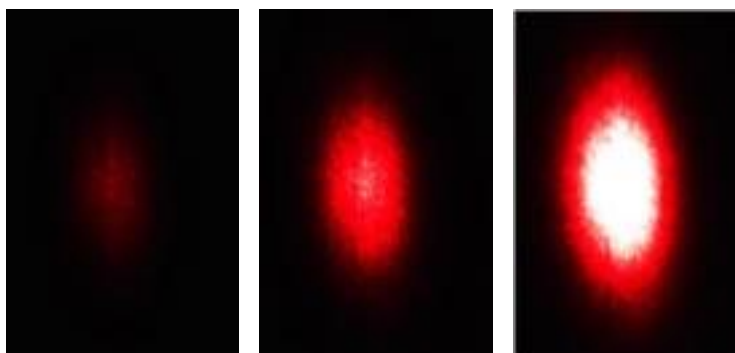


Fig. 4 : Effet trachéide avec trois temps d'exposition différents (à gauche : court, au centre : moyen, à droite : long)

Trois algorithmes de détection d'ellipse ont été utilisés : les moments d'inertie, les moindres au carrés et l'analyse en composantes principales. Pour chaque image, des seuillages à différentes valeurs d'intensité ont été effectués.

## Résultats

Les paramètres de grand axe, de petit axe, d'aire, de ratio et d'orientation pour différents niveaux de seuillage des ellipses sont présentés sur la Fig. 5.

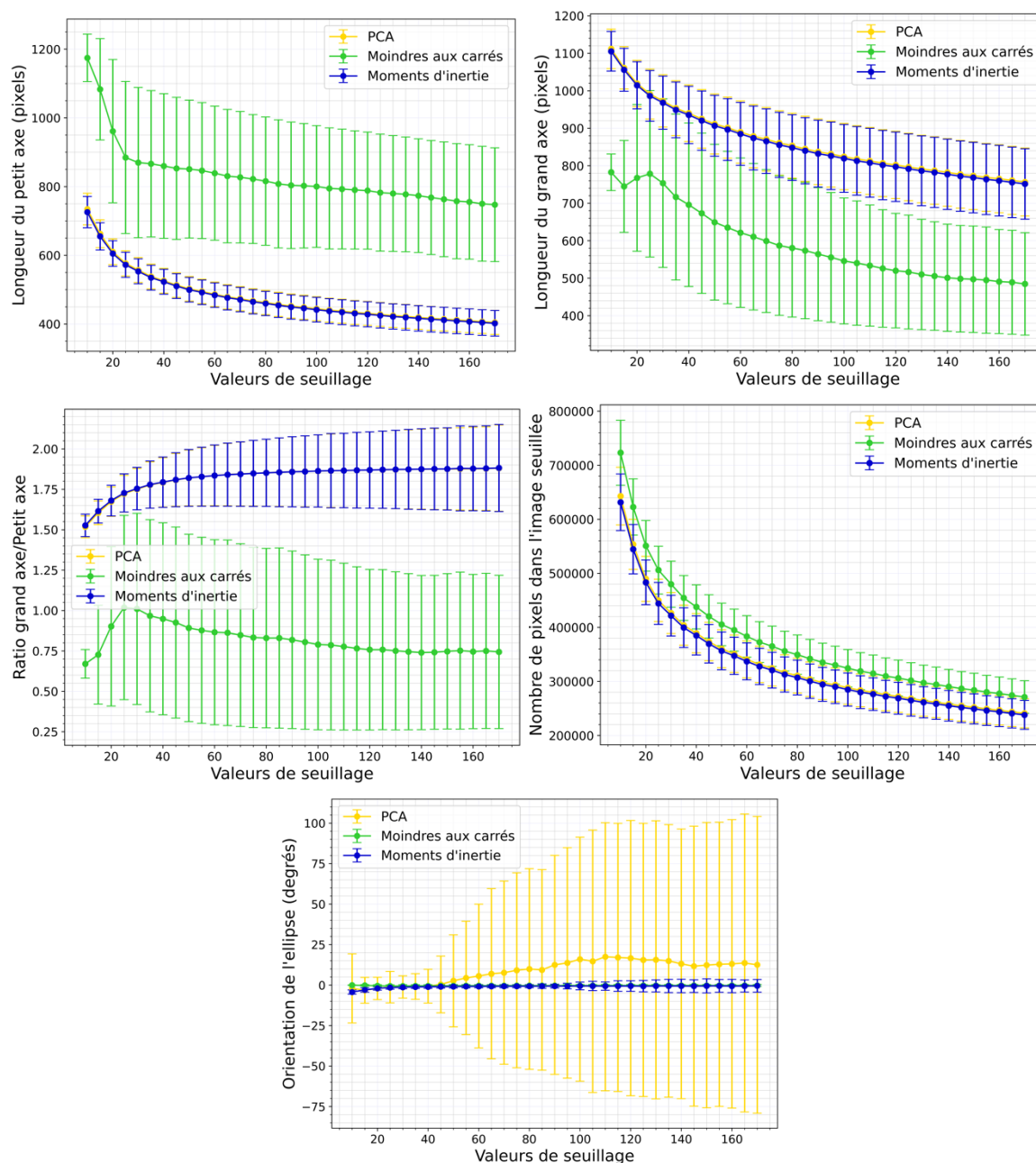


Fig. 5 : Paramètres d'ellipse moyens obtenus avec différents algorithmes en fonction des valeurs de seuillage pour l'échantillon B et un temps d'exposition long,

Une forte variabilité est observée sur les propriétés extraites selon la méthode utilisée, notamment le ratio et l'orientation des fibres.

## Conclusions et perspectives

Les variations mises en avant montrent que le traitement des images est un élément de la chaîne de traitement de l'effet trachéide à ne pas négliger. Dans la suite, il est prévu d'effectuer des mesures sur des ellipses plus spécifiques (par exemple au niveau des zones de transition bois de printemps/bois d'été), et de tester d'autres méthodes d'extraction d'information sur les

images, qui n'impliquent pas forcément d'extraction d'ellipse mais prennent en compte des caractéristiques plus globales.

### **Remerciements**

Ce travail est soutenu par la région Bourgogne-Franche-Comté.

### **Références**

Briggert A, Hu M, Olsson A, Oscarsson J (2018) Tracheid effect scanning and evaluation of in-plane and out-of-plane fiber direction in Norway spruce timber. *Wood and Fiber Science*. 50. 411-429. 10.22382/wfs-2018-053.

Kienle A, D'Andrea C, Foschum F, Taroni P, Pifferi A (2008) Light propagation in dry and wet softwood, *Opt. Express* 16, 9895-9906.

Nyström J (2003) Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 41, Issues 1–3.

Schoch, W, Heller I, Schweingruber FH, Kienast F (2004). *Wood anatomy of central European Species*. Birmensdorf, Switzerland: Swiss Federal Institute for Forest.

Trouy MC (2015) *Anatomie du bois. Formation, fonctions et identification*. Editions Quae.

## **Master Sciences du Bois à l'Université de Montpellier : Bilan après 4 ans de pédagogie active**

Auréliе АUTISSIONER<sup>1</sup>, Sandrine BARDET<sup>2</sup>, Bruno CLAIR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences, Université de Montpellier

<sup>2</sup>LMGC, Université de Montpellier, CNRS

[aurelie.autissier@umontpellier.fr](mailto:aurelie.autissier@umontpellier.fr)

**Mots clefs :** formation ; master ; sciences du Bois ; interdisciplinarité ; apprentissage actif ; approche par compétences ; projets

### **Introduction**

Le master Sciences du Bois initié en 2018 lors des Journées Scientifiques du GDR à Cluny, créé en 2021, fait cette année sa quatrième rentrée. Pendant les 2 années de formation les étudiant·es acquièrent des compétences et des connaissances interdisciplinaires (biologie, physique, mécanique, chimie, sciences humaines, économiques et sociales) appliquées aux sciences du bois. Le matériau bois est présenté depuis sa formation dans l'arbre jusqu'à ses multiples usages, des produits bois aux molécules, en intégrant les enjeux économiques, sociaux et environnementaux.

En ce début de quatrième année de fonctionnement, nous dressons le bilan des réussites et des points d'amélioration identifiés.

### **La sélection à l'entrée et l'insertion professionnelle au master**

#### *Les flux entrants*

Le master Sciences du Bois se base sur des Unités d'Enseignements interdisciplinaires, une équipe pédagogique de différentes disciplines et des étudiant.es issu.es de formations variées.

Sur les quatre promotions du master toutes confondues, les étudiant·es sélectionné·es présentent les profils suivants :

- 41 hommes et 29 femmes soit 59% d'hommes et 41% de femmes,
- 64% de licence généraliste, 26% de licence professionnelle ou bachelor universitaire, 6% en reprise d'étude et 4% d'école d'ingénieur,
- 41% de l'Université de Montpellier, 56% de France (hors UM) et 3% hors Union Européenne,
- 39% de formation biologie, 24% de physique/mécanique, 14% de filière forêt/bois, 8% de chimie et 6 % de physique/chimie,
- 74% sont inscrits en formation initiale, 21% en alternance et 5% en formation continue,
- les âges sont compris entre 19 à 54 ans.

L'exigence dans la sélection et l'accompagnement individuel permettent une bonne réussite des étudiant·es du master lors de leur cursus. Sur les trois promotions de M2, seulement deux étudiants se sont réorientés (dont un étudiant qui a été embauché par sa structure d'alternance). Le taux de réussite est de 96%.

#### *Attractivité du master*

Le master est de plus en plus connu à l'échelle nationale et les candidatures ont progressé de 51 dossiers en 22-23 à 76 en 23-24 puis 78 en 24-25.

Sur les 2 dernières années, le taux de sélection aux entretiens oraux est environ de 2/3 et le taux de sélection finale de 1/3.

### Stages

Le master reçoit de nombreuses offres de stage qui sont diffusées aux étudiant.es.

La destination des stages sur les trois promotions des M1 est de 75% en France métropolitaine, 15% dans les DOM-TOM et 10% à l'étranger (Fig. 1).

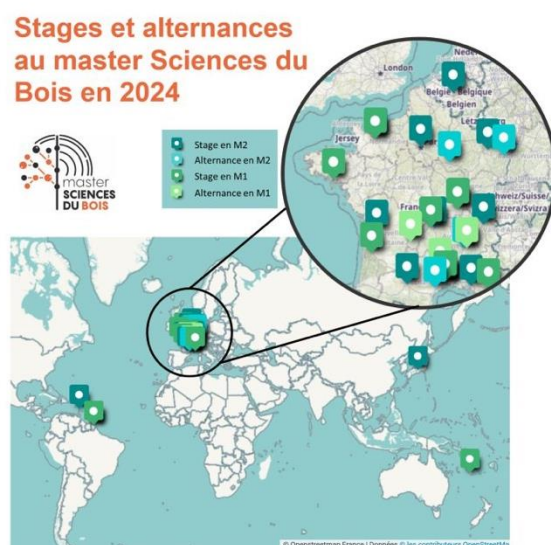


Fig. 1 : Destination des stages et alternances de deux promotions en 2024

### Insertion professionnelle

L'équipe pédagogique du master Sciences du Bois accompagne dans leur projet professionnel les étudiant.es en transmettant des offres d'emploi reçues de la France entière. Un groupe LinkedIn a aussi été créé pour la diffusion d'offres au réseau des anciens.

Les étudiant.es du master Sciences du Bois sont formé.es à la démarche scientifique par et pour la recherche et l'innovation dans la filière forêt bois.

Les types d'emploi occupés sont cohérents avec les compétences interdisciplinaires et transversales acquises à la fin du master. L'insertion professionnelle des diplômé.es de la 1<sup>ère</sup> promotion un mois après la fin de la formation est la suivante : sept chargé.es de missions forêt/bois, quatre contrats doctoraux, une ingénieure d'étude R&D, une création d'entreprise et deux poursuites d'étude, deux recherches d'emploi et un emploi hors filière forêt-bois.

Le rayonnement de la formation est principalement français : 81% ont trouvé leur premier emploi en France métropolitaine. Les étudiant.es de la première promotion sortante occupent pour la majorité un CDD en sortie de diplôme (dont 30% de contrat doctoral).

L'enquête concernant la 2<sup>ème</sup> promotion sortante est en cours, nous pourrons communiquer ces résultats lors du GDR. Au premier septembre, 47% (soit 8/17) des étudiant.es ont déjà signé un contrat de travail dont deux contrats doctoraux.

### La pédagogie au master

La pédagogie active mise en place au master a quatre objectifs pédagogiques principaux :

### *Apporter la compétence d'identifier, formuler et résoudre des problèmes complexes en sciences du bois*

La méthode d'enseignement du master se base sur la pédagogie par problèmes et par projets, qui place l'étudiant-e au centre de l'apprentissage. L'apprentissage par problème est mis en œuvre sous forme de PROSIT (PROblem SITuation) qui a pour objectif de donner du sens aux connaissances et de favoriser l'appropriation des savoirs par les apprenant-es.

Pour tous les Prosit, du temps en autonomie dans l'emploi du temps est prévu pour permettre les apprentissages entre la séance tutorée « aller » et la séance tutorée « retour » (Fig. 2). La plupart des UE du master (12 UE) présentent ce format pédagogique (soit 42 heures de séances aller ou retour, sans compter le travail en autonomie des étudiants).

Dans le cadre de l'amélioration continue du master, deux nouveaux sujets ont été rédigés cette année et six chercheurs qui ont récemment intégré l'équipe pédagogique ont été formés à cette méthode d'enseignement.



Fig. 2 : Premier Prosit de l'année de Master 1

### *Favoriser la coopération dans la gestion de projet interdisciplinaire*

Pendant les deux années de master, trois UE sont des projets longs. Ils ont pour objectif de développer les compétences transversales assurant l'adaptabilité des diplômé-es au secteur de l'éco-ingénierie et des matériaux biosourcés : gestion de projet, autonomie, résolution de problème, démarche scientifique, démarche d'entrepreneuriat, intelligence collective. Les projets principaux sont le Fil Rouge, les « études de cas » en Master 1 et des projets R&D en Master 2.

Le Fil Rouge débute dès la rentrée de Master 1 avec la description in situ de l'arbre de la promotion (Fig. 3 et 4) et se termine à la fin du Master 2 avec la présentation de trois produits innovants valorisant cet arbre sous forme de structure, de composite ou d'extraction chimique. L'objectif en Master 1 est de décrire les propriétés de l'arbre d'intérêt de manière interdisciplinaire (physique, chimie, anatomie, écologie). Les étudiant-es gèrent et coordonnent, en classe entière et en sous-groupes, le projet scientifique découpé en trois périodes pour répondre à trois questions scientifiques.

Chaque année ce projet s'améliore. L'équipe pédagogique a remarqué une difficulté à respecter les délais du projet, à faire preuve d'autonomie sur les créneaux laissés libres, et a mis en place des responsabilités qui donnent des missions à chacun tout au long de l'année. Le lancement de cette nouvelle année montre des signes d'amélioration dans la gestion du projet scientifique qui sont à confirmer. En Master 2 l'objectif est d'explorer les valorisations possibles et de développer un produit à partir de la matière caractérisée. Lors du debrief de fin d'année, les étudiants ont fait le retour sur le manque de temps pour réaliser correctement cet objectif.

L'équipe pédagogique a modifié le scénario pédagogique de cette UE et avancé la rentrée de deux jours ce qui permet un début de réflexion quelques semaines plus tôt sur ce projet.



Fig. 3 : Travaux pratiques sur l'arbre d'intérêt



Fig. 4 : Echantillonnage de dendrochronologie

### *Favoriser un réseau professionnel pour l'étudiant*

Le master Sciences du Bois a pour objectif de constituer un réseau pour chaque étudiant du master. Les échanges avec les différents intervenants du master, mais aussi les déplacements professionnels, permettent en partie de mettre en place ce lien. Dès la première semaine de Master 1, les étudiant-es sont en immersion dans la filière forêt bois en Occitanie avec une équipe d'enseignant-chercheurs et rencontrent des acteurs de la filière : ONF, CNPF, PNR, propriétaire forestier, exploitant forestier, scieur, menuisier, industriels de produits bois. Au mois de Janvier, ils assistent à des cours et TP pendant une semaine à l'ENSAM de Cluny, ce qui leur permet de rencontrer ce réseau d'ingénieurs et les installations techniques. En master 2, ils se rendent à l'IUT de Nîmes et l'IMT Mines d'Alés.

Tout au long de l'année, ils participent à des visites d'entreprises, de chantier ou de laboratoires du bassin Montpellierain.

Chaque vendredi, les causeries bois sont un temps de discussions avec des professionnels, entrepreneurs, artisans, chercheurs et permettent également de découvrir des sujets et structures qui ne font pas partie du programme pédagogique du master 1 ou 2.

L'immersion dans le milieu professionnel de la filière forêt-bois est permise par deux stages longs (16 semaines en M1 puis 18 en M2) ou grâce à l'alternance pour les apprenti.es (53 semaines sur les deux années).

Toutes ces actions permettent d'aider les étudiant.es à formuler le projet professionnel qui les motive et à s'insérer dans la filière forêt-bois.

### *Formuler et recevoir un retour*

Une fois par semaine un temps de discussion entre chaque promotion et les responsables du master permet de faire le point sur les séances de chaque UE. Les étudiant-es apprennent à formuler des retours à l'équipe pédagogique pour comprendre ce qui est bien perçu ou pourrait être amélioré. Ces retours peuvent donner lieu soit à une explication des choix pédagogiques soit à une modification pour l'année en cours ou l'année suivante.

Une séance plus longue est prévue en fin d'année pour recevoir les retours des étudiant-es sur l'année avant le départ en stage. C'est un moment important qui permet à l'équipe de pilotage de préparer l'année suivante et d'améliorer la formation.

Les retours sur les savoirs-être et savoir-faire individuels des étudiant.es sont très présents par différents moyens dans les enseignements : l'évaluation par les pairs, debrief oral, retour sur les erreurs fréquentes.

### **Bilan du fonctionnement du master Sciences du Bois**

Le master fonctionne grâce à

- une coordinatrice pédagogique diplômée de l'ENSTIB qui accompagne l'équipe pédagogique, seconde les responsables de modules, encadre les pratiques pédagogiques innovantes ;
- une gestionnaire administrative, financière et pédagogique qui réalise les achats et les missions, suit les dépenses et les recettes, assure le secrétariat pédagogique ;
- une équipe de pilotage de 5 chercheurs et enseignants-chercheurs + la coordinatrice ;
- une équipe pédagogique de 42 intervenant.es et responsables de modules ;
- une équipe ressources de 216 personnes sollicitées ponctuellement dans l'année ;
- des financements publics sur Appels à Projet de l'UM ou nationaux et des financements privés (apprentissage, TA, mécénat).

L'équipe pédagogique est constituée d'enseignants chercheurs de l'UM, de chercheurs des organismes (CIRAD, INRAE, CNRS, IRD) et de professionnels du privé.

### **Conclusion**

Le master Sciences du Bois atteint son objectif de formation des étudiants avec un niveau de compétence satisfaisant. La création de ce master a permis la structuration d'une équipe dynamique d'acteurs privés et publics, pluridisciplinaire sur le bois dans le bassin montpelliérain. Cette équipe s'est rassemblée notamment lors du conseil de perfectionnement présidé par Meriem Fournier. Ce conseil, qui a rassemblé les entreprises partenaires, la direction et les départements de la faculté de sciences, et le représentant de l'UM pour l'innovation pédagogique, est une illustration de l'implication de tous dans ce projet commun pour construire ensemble les évolutions possibles du master.

### **Remerciements**

Le master fonctionne grâce à une équipe pédagogique incroyable qui donne beaucoup. Merci ! Nous remercions aussi nos partenaires : la Fondation Alpes Contrôles, Céribois, Compcent, Fibre Excellence, Neofor, SIAT. Merci enfin au GDR Sciences du Bois d'accueillir les étudiant.es du Master aux Journées Scientifiques Annuelles et au labex Numev de financer d'organiser ce déplacement pour les deux promotions du master depuis la création du master. C'est une opportunité de rencontre unique des acteurs de la recherche, un premier pied qui suscite des vocations pour des poursuites en thèse et une expérience inoubliable pour chacun.e d'entre elles et eux.



## Multiscale modelling of delignified wood's thermal and elastic behaviour

CHIN Yi Hien<sup>1,2</sup>, AUSLENDER François<sup>1</sup>, GRIL Joseph<sup>1,3</sup>, VIAL Christophe<sup>1</sup>,  
MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,4</sup>, OULDBOUKHITINE Salah-Eddine<sup>1</sup>,  
LABONNE Nicolas<sup>2</sup>, BIWOLE Pascal<sup>1,5,6</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, 63000 Clermont-Ferrand, France.

<sup>2</sup>Dagard Company, 23600 Boussac, France.

<sup>3</sup>Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont-Ferrand, France.

<sup>4</sup>CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon.

<sup>5</sup>MINES Paris, PSL Research University, PERSEE - Center for Processes, Renewable Energies and Energy Systems, France.

<sup>6</sup>California State Polytechnic University, Humboldt, School of Engineering, Arcata, CA 95521, USA.

[yi\\_hien.chin@uca.fr](mailto:yi_hien.chin@uca.fr)

**Key words:** Delignified wood; Effective properties; Elastic behaviour; Homogenisation; Multiscale modelling; Thermal conductivity

### Context and objectives

To minimise greenhouse gas emissions, the development of biobased building materials is increasingly advancing. Wood is a renewable resource that stores carbon throughout its life cycle and only releases it at its decomposition. To maximise the potential of wood, various modification techniques have been developed to improve its properties. Among them, delignification involves the extraction of non-cellulosic substances from wood through chemical treatment, transforming wood into a bio-sourced insulating material while preserving its hierarchically aligned cellulosic structures (Li et al 2018). This delignification process creates nanopores within the cell wall and micro-cracks caused by cell wall separation, thereby reducing the density, the thermal conductivity and the mechanical properties of the wood.

There is a gap in the literature, as most studies are empirical with limited applications and require extensive experimental trials. Additionally, there has not been an in-depth thermal and mechanical study exploring delignified wood to date. To further deepen the understanding of delignified wood, this study proposes a multiscale homogenisation modelling approach to examine its thermal conductivity and elastic properties. Firstly, the relevant input properties of the cellulose and polymer matrix are obtained from the literature (Tab. 1, 2). Then, the multiscale models are solved by the finite element method using COMSOL Multiphysics® software (COMSOL AB n.d.). After confronting with the experimental data from the literature for both native hardwood and softwood, the aim is to understand the influence of the delignification on the wood structure at the micro, meso and macro scales. Parametric studies will be conducted by varying the degree of delignification to determine the optimum balance between thermal and mechanical properties. This will also be useful for predicting the properties of delignified wood from different species, considering the variations in cellulose content, microfibril angle, cell geometry, and earlywood-latewood ratio.

### Multiscale homogenisation modelling approach

The concept of homogenisation is to average the behaviour of a material with a complex periodic microstructure by replacing it with an equivalent homogeneous continuum. A

representative volume element (RVE) refers to a portion of a material whose effective behaviour represents the material as a whole at the next scale. At each scale, the unit cell is subjected to periodic boundary conditions to determine the homogenised material properties. The input data, such as the geometrical dimensions and properties of elementary constituents, are derived from the works of Phan et al (2024) and Eitelberger and Hofstetter (2011). After the delignification treatment, Scanning Electron Microscopy (SEM) images (Fig. 1) reveal the creation of nanopores within the polymer matrix and the formation of micro-cracks at the middle lamella, where the lignin content is highest.

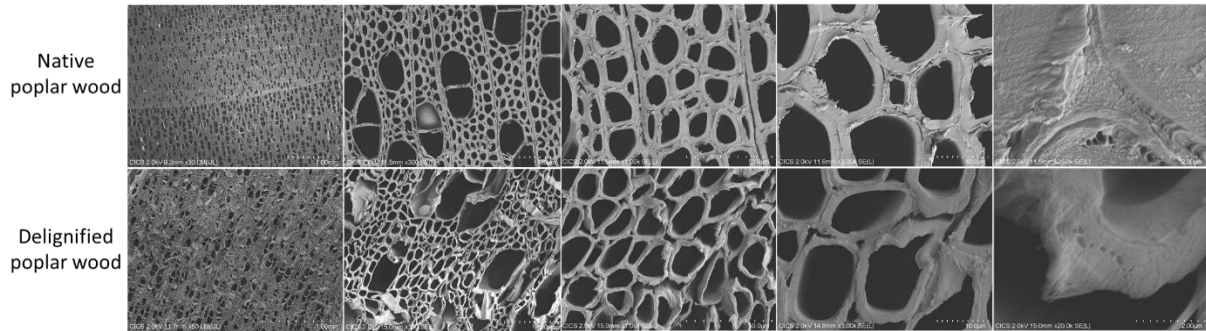


Fig. 1 : SEM images of poplar wood after delignification treatment compared with native wood.

The multiscale homogenisation procedure involves RVEs at different length scales:

- Nano-scale: Self-consistent model of the polymer network consisting of lignin, hemicellulose and nanopores created.
- Micro-scale: An RVE of cell wall material made up of cellulose fibrils surrounded by a polymer matrix.
- Meso-scale: RVE of earlywood with hexagonal cell, where the cell wall layers consist of S1(+ML+P), S2 and S3 with properties rotated at the microfibril angle. An RVE of earlywood with a vessel. An RVE of latewood.
- Macro-scale: An RVE of annual growth ring.

The boundary conditions were applied using the built-in periodic condition feature in the Heat Transfer and Structural Mechanics modules of COMSOL Multiphysics® software. The Identical Mesh feature was used in the mesh sequence to improve the accuracy of the analysis by ensuring that each pair of matching boundaries share the same mesh. The finite element mesh of each RVE at various scales is shown in Fig. 2.

## First results

### *Effective thermal conductivity*

To determine the effective thermal conductivity of a material, all modes of heat transfer (conduction, convection and radiation) must be considered. The thermal conductivities of the elementary components of wood are given in Tab. 1.

Tab 1 : Input thermal properties of elementary components of wood (Eitelberger and Hofstetter 2011).

Elementary component	Component behavior	Thermal conductivity [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Hemicellulose	Isotropic	0.34
Lignin	Isotropic	0.39
Cellulose	Transversely isotropic	$k_{cellulose,11} = 0.26$ $k_{cellulose,22} = 0.26$ $k_{cellulose,33} = 1.04$

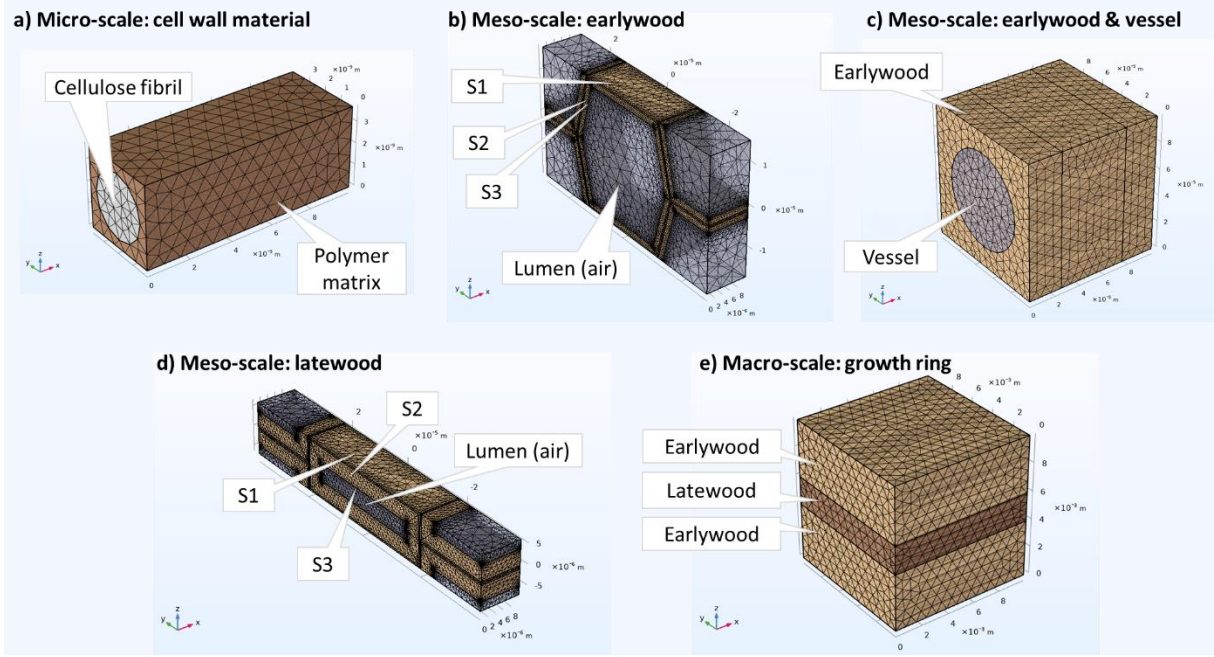


Fig 2 : Mesh of different RVEs. (a) Cell wall material. (b) Earlywood with cell wall layers of S1, S2 and S3 subjected to MFA. (c) Earlywood with a vessel. (d) Latewood with cell wall layers of S1, S2 and S3 subjected to MFA. (e) Annual growth ring.

Convection is only relevant if the Grashof number, defined by equation (1), exceeds 1000 (Gibson and Ashby 1988):

$$Gr = \frac{g\beta_e\Delta T_c l^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (1)$$

where  $g$  is the gravitational acceleration ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\beta_e$  is the volume coefficient of expansion for gas ( $\beta_e = 1/T$  for an ideal gas),  $\Delta T_c$  is the temperature difference across one cell,  $l$  is the cell size, and  $\rho$  and  $\mu$  represent respectively the density and dynamic viscosity of the gas. To exceed a Grashof number of 1000, the cell size  $l$  has to be larger than 10.69 mm. However, the lumen diameter in wood cells is much smaller, making convection negligible at the material scale.

To consider the radiation heat transfer, the thermal conductivity of the pore can be expressed by a combination of gas conduction and radiation in parallel using equation (2).

$$k_{pore} = k_{air} + k_{rad} \quad (2)$$

where  $k_{air}$  is  $0.026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  and  $k_{rad}$  is the radiative thermal conductivity which depends on the pore size. The Rosseland approximation for optically thick material is used to calculate  $k_{rad}$  with equation (3) (Pennec et al 2013).

$$k_{rad} = 4 d_{pore} e \sigma T^3 \quad (3)$$

where  $d_{pore}$  the largest gap dimension in direction of heat flow,  $e$  is the surface emissivity,  $\sigma$  is the Stefan–Boltzmann constant ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ) and  $T$  is the average absolute temperature of the region where radiation occurs. By assuming an average emissivity of 0.924 for wood and  $T$  at  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , the pore thermal conductivity was calculated for various pore dimensions (Fig. 3).

For nanopores, gaseous thermal conductivity is described using the Knudsen formula, also known as Kaganer's model:

$$k_{nanopores} = \frac{k_{air}}{1 + 2 \beta K_n} \quad (4)$$

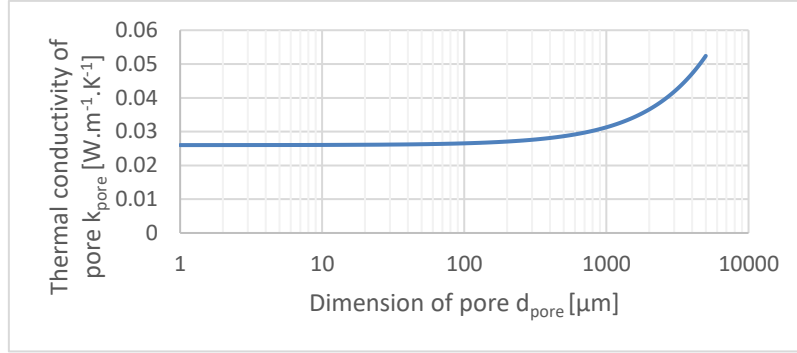


Fig 3: Thermal conductivity of pore (gas conduction + radiation) vs. pore dimension.

where  $\beta$  is the coefficient that characterizes the efficiency of energy transfer from molecule-wall collision (for air,  $\beta=2$ );  $K_n$  is the Knudsen number defined by equation (5).

$$K_n = \frac{l_{mean}}{D} \quad (5)$$

where  $l_{mean}$  is the mean free path of air molecules (70 nm) and  $D$  is the average nanopore diameter (4 nm, from the nitrogen sorption).

The self-consistent modelling of the effective thermal conductivity of the non-cellulosic matrix with nanopores is done by using the Maxwell-Eucken model or equivalently the Hashin-Shtrikman upper bound (equation 6), assuming air is present within the matrix as spherical inclusions.

$$k_{ME} = k_s \frac{k_f + 2k_s + 2\varepsilon_p(k_f - k_s)}{k_f + 2k_s - \varepsilon_p(k_f - k_s)} \quad (6)$$

where  $k_s$  and  $k_f$  represent the thermal conductivities of polymer matrix and nanopores respectively and  $\varepsilon_p$  is the nanoporosity from delignification.

At subsequent scales, the modelling strategy in COMSOL Multiphysics® software remains identical. A temperature difference was applied to two faces perpendicular to the heat transfer direction, and the heat flux through the RVE was determined. Using Fourier's law, thermal conductivity in this direction is defined by equation (7).

$$k_{eff} = \frac{l * \Phi}{\Delta T * S} \quad (7)$$

where  $l$  is the length in the direction of the flux,  $\Phi$  is the heat flux,  $\Delta T$  is the temperature difference, and  $S$  is the surface area.

This operation was repeated in the other two directions of the REV to quantify the anisotropic thermal conductivity values.

#### *Effective elastic properties*

Wood exhibits orthotropic behaviour, it has different properties depending on the loading direction. Nine independent variables are needed to fully characterise its elastic behaviour. Tab. 2 shows the elastic properties of the elementary components of wood.

To incorporate the nanoporosity in the polymer matrix which is assumed isotropic, the self-consistent model is applied by assuming isotropic porosity distribution. The effective shear modulus  $\tilde{G}$  is determined by solving the quadratic equation (8).

$$16\tilde{G}^2 + [(3 - \varepsilon_p)K - 4(4 - 5\varepsilon_p)G]\tilde{G} - 3(1 - 2\varepsilon_p)KG = 0 \quad (8)$$

Tab 2 : Input mechanical properties of elementary components in wood. (Phan et al 2024)

Non-cellulosic matrices	Young's modulus	$E_m$ (GPa)	2
	Poisson's ratio	$\nu_m$	0.33
Cellulose fibrils	Longitudinal Young's modulus	$E_L$ (GPa)	138
	Transversal Young's modulus	$E_{TT}$ (GPa)	27.2
	Longitudinal Poisson's ratio	$\nu_{LT}$	0.1
	Transversal Poisson's ratio	$\nu_{TT}$	0.33
	Longitudinal Shear modulus	$G_{LT}$ (GPa)	4.4
	Transversal Shear modulus	$G_{TT}$ (GPa)	$E_{TT} / 2(1+\nu_{TT})$

where  $\tilde{G}$  is the effective shear modulus for the porous material,  $K$  and  $G$  are the bulk and shear moduli of the matrix,  $\varepsilon_p$  is the nanoporosity. The physically meaningful (positive) root of this equation gives  $\tilde{G}$ . Then, the effective bulk modulus  $\tilde{K}$  is calculated using equation (9).

$$\tilde{K} = \frac{4(1 - \varepsilon_p)K \tilde{G}}{3\varepsilon_p K + 4 \tilde{G}} \quad (9)$$

At the subsequent scales, the modelling strategy using COMSOL Multiphysics® software applies a deformation approach. Periodic conditions  $u(x) = \bar{\varepsilon} x + u'(x)$  where  $\bar{\varepsilon}$  is the imposed macroscopic strain and  $u'(x)$  a periodic displacement field, are used on each unit cell. By applying 6 different elementary loadings, the local stress field is obtained, and therefore its spatial average, which corresponds to the macroscopic stress. The effective tensor of elastic moduli, with Voigt notations, can be computed by means of equation (10).

$$\begin{pmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_3 \\ \bar{\sigma}_4 \\ \bar{\sigma}_5 \\ \bar{\sigma}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} & \tilde{C}_{13} & \tilde{C}_{14} & \tilde{C}_{15} & \tilde{C}_{16} \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} & \tilde{C}_{23} & \tilde{C}_{24} & \tilde{C}_{25} & \tilde{C}_{26} \\ \tilde{C}_{31} & \tilde{C}_{32} & \tilde{C}_{33} & \tilde{C}_{34} & \tilde{C}_{35} & \tilde{C}_{36} \\ \tilde{C}_{41} & \tilde{C}_{42} & \tilde{C}_{43} & \tilde{C}_{44} & \tilde{C}_{45} & \tilde{C}_{46} \\ \tilde{C}_{51} & \tilde{C}_{52} & \tilde{C}_{53} & \tilde{C}_{54} & \tilde{C}_{55} & \tilde{C}_{56} \\ \tilde{C}_{61} & \tilde{C}_{62} & \tilde{C}_{63} & \tilde{C}_{64} & \tilde{C}_{65} & \tilde{C}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \\ \bar{\varepsilon}_3 \\ \bar{\varepsilon}_4 \\ \bar{\varepsilon}_5 \\ \bar{\varepsilon}_6 \end{pmatrix} \quad (10)$$

where  $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_{ii}$ ,  $\bar{\varepsilon}_i = \bar{\varepsilon}_{ii}$  for  $i = 1$  to  $3$ ,  $\bar{\sigma}_4 = \bar{\sigma}_{23}$ ;  $\bar{\sigma}_5 = \bar{\sigma}_{13}$ ;  $\bar{\sigma}_6 = \bar{\sigma}_{12}$  and  $\bar{\varepsilon}_4 = 2\bar{\varepsilon}_{23}$ ;  $\bar{\varepsilon}_5 = 2\bar{\varepsilon}_{13}$ ;  $\bar{\varepsilon}_6 = 2\bar{\varepsilon}_{12}$ .

## Conclusion and perspectives

In this work, we investigated the thermal and mechanical properties of both native and delignified wood through homogenisation-based multiscale models. We introduced a self-consistent model to account for nanoporosity created within the cell wall material and used the finite element method to homogenise the thermal and mechanical properties. The proposed models are expected to be confronted with the literature data and will enable the prediction of the effective thermal conductivity and elastic properties of wood at varying degrees of delignification. This multiscale approach encourages the applications of modified wood. Managing thermal anisotropy can allow an appropriate distribution of heat flow through the material, while mechanical anisotropy allows for the selection of appropriate material orientations based on load-charging requirements. In addition, these models can predict delignified properties for different wood species. Future works need to consider the water content, particularly after material stabilisation under ambient conditions. In the long term, validation of these models will require testing with a large number of delignified wood samples and over a larger scale.

## Acknowledgements

This work is supported by the French National Research Agency (ANR) and the company Dagard, under “France Relance” plan.

## References

- COMSOL AB (n.d.) COMSOL Multiphysics® v. 6.2 [Computer software]. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
- Eitelberger J, Hofstetter K (2011) Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. *Composites Science and Technology*, 71(2), 134–144.
- Gibson LJ, Ashby MF (1988) *Cellular solids: Structure & properties* (1st ed). Pergamon Press.
- Li T, Song J, Zhao X, et al (2018) Anisotropic, lightweight, strong, and super thermally insulating nanowood with naturally aligned nanocellulose. *Science Advances*, 4(3), eaar3724.
- Pennec F, Alzina A, Tessier-Doyen, Naït-ali B, Mati-Baouche N, De Baynast H, Smith DS (2013) A combined finite-discrete element method for calculating the effective thermal conductivity of bio-aggregates based materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60, 274–283.
- Phan N-T, Auslender F., Gril J., Moutou Pitti R. (2024) Effects of cellulose fibril cross-linking on the mechanical behavior of wood at different scales. *Wood Science and Technology*, 58(4), 1555–1583.

## Contribution au comportement en ambiance tropicale de l'Evino en conditions climatiques contrôlées

MOUMBINA DINDZAMBOT Lié Régis<sup>1</sup>, IKOGOU Samuel<sup>2</sup>, TALLA Pierre Kisito<sup>3</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Libreville, Gabon

<sup>2</sup>Université des Sciences et Techniques de Masuku, Franceville, Gabon

<sup>3</sup>Université de Dschang, Dschang, Cameroun

<sup>4</sup>Institut de Recherche Technologique, Libreville, Gabon

<sup>5</sup>Université de Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, France

[regismoumbina@hotmail.com](mailto:regismoumbina@hotmail.com)

**Mots-clés :** Evino ; humidité ; température, flèche

### Contexte et objectifs

Considéré à juste titre comme un bois de qualité secondaire, l'Evino (*Vitex* sp) fait partie des bois qui ne font pas encore l'objet d'une transformation à l'échelle industrielle. N'ayant pourtant pas le statut d'essence pionnière, l'Evino se rencontre dans plusieurs zones du Gabon (Herbier Gabon 2024) ainsi que dans certaines régions du Golfe de Guinée. Il présente un bois jaunâtre, assez tendre et léger (Détienne et al 1982), avec des arbres pouvant atteindre des de 60 à 70 cm.

La caractérisation des propriétés technologiques de ce bois permettra de promouvoir cette essence sur le plan national, de sorte à la substituer à celles présentement en exploitation intense. Par ailleurs, il se trouve qu'avec l'expansion démographique, la demande en ressources naturelles se fait grandissante. D'où la nécessité d'ouvrir davantage le panel d'essences, dont les propriétés physiques et mécaniques ont un fort potentiel de valorisation. En ce sens, il est important de s'intéresser à l'effet des conditions climatiques sur le comportement des propriétés physique et mécanique du bois d'Evino (Navi et Héger 2005, Varnier 2019, Asseko 2019, Talla 2019).

L'objectif principal de cette étude est de valider le dispositif expérimental mis en place, par la maîtrise des températures tout en évitant la dispersion des paramètres entre le milieu extérieur et le dispositif expérimental, tout en observant la variation de la flèche, au cours des essais en flexion statique 4 points. Par ailleurs, Daher et al (2023) préconise la nécessité d'étudier l'influence de la température et de la teneur en eau sur la résistance en compression du bois afin de mieux comprendre le comportement du bois.

### Matériel et méthode

Afin de mettre en évidence l'effet de la température sur le comportement différé de l'Evino, un dispositif d'essai de flexion statique 4 points, en milieu contrôlé (T°C, HR%), a été conçu.

#### *Conception du dispositif*

Le dispositif expérimental (Fig. 1) est conçu à d'un caisson réalisé avec des parois en bois avec au centre du polystyrène (Fig. 1c). Ce caisson permet d'assurer l'étanchéité thermique du dispositif d'essais. Le dispositif ainsi conçu possède :

- La capacité de ne pas laisser échapper la chaleur ;

- Un mécanisme permettant la variation de la température tout au long de l'expérience ;
- Des capteurs de déformation avec dispositif d'acquisition des données ;
- Une batterie assurant le relai électrique en cas de rupture d'électricité tout en fournissant un courant continu aux capteurs.

La température compte parmi les paramètres physiques dont l'influence sur le comportement élastique du bois est importante. De plus, Guitard (1987) fait le constat que l'augmentation du taux d'humidité a pour effet la plastification des constituants en abaissant la température de transition vitreuse. L'expérience qui s'appuie principalement sur l'introduction de la température permet de comprendre comment le bois d'Evino réagit aux variations de température tout en permettant d'approfondir les connaissances sur ses propriétés mécaniques et son comportement structurel.

Cette étude qui fait intervenir la température comme catalyseur de l'expérience, permettra par sa variation de raccourcir le temps de l'expérience de manière à déterminer le module d'élasticité.

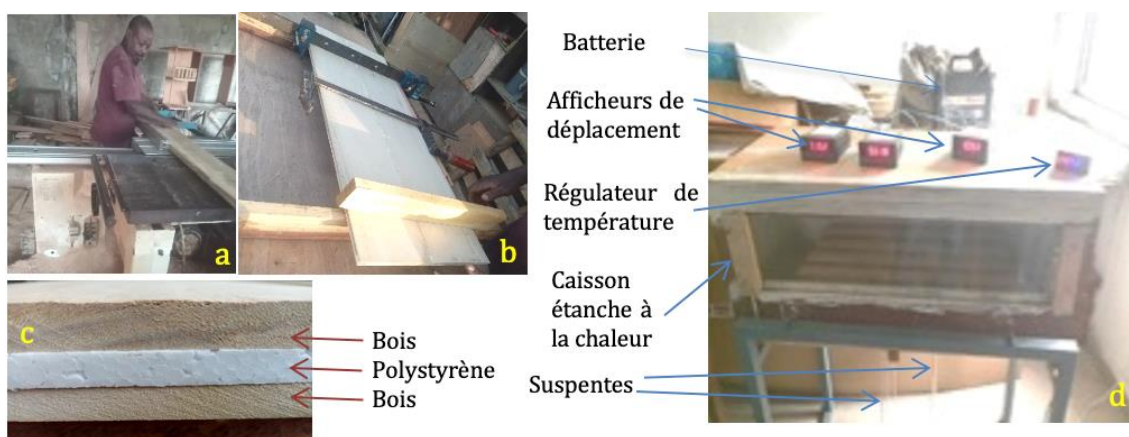


Fig. 1 : Dispositif expérimental : (a, b) usinage du dispositif ; (c) parois constitutives ; (d) vue d'ensemble

Le dispositif développé intègre :

- un thermostat numérique STC-3028, relié d'une part à une résistance chauffante pour le contrôle de la température, et d'autre part au capteur hygromètre pour la mesure de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du dispositif ;
- des capteurs de déplacement de type KTR 25 mm, équipé d'afficheur numérique en temps réel. Ces capteurs sont positionnés à mi-travée en dessous des éprouvettes pour mesurer la flèche, à raison d'un capteur par poutre testée.

L'acquisition des données se faisant mécaniquement, des relevés de données ont été réalisés de manière séquentielle : d'abord toutes les 5 minutes, ensuite le pas est augmenté à 10 minutes, puis 15 minutes jusqu'à 1 heure. Ces essais ont été effectués pour des séries de chargement de 2 jours jusqu'à constatations de la stabilisation des mesures.

#### *Méthode expérimentale*

Le schéma de l'essai est relatif à un essai de flexion statique 4 points, qui consiste à évaluer les caractéristiques mécaniques en condition variables contrôlées. Grâce à un variateur de température, à partir d'éprouvettes de dimension 570 x 30 x 30 mm<sup>3</sup> (L x R x T) placées sur deux appuis cylindriques à axes parallèles, pour une charge fixe inférieure à la charge maximale ayant entraîné la rupture (Fig. 2).



Sur la base de la caractérisation de l'Evino, la charge de rupture au taux d'humidité d'environ 12,29% a été déterminée afin de localiser le domaine élastique, qui correspond au domaine de déformations non permanentes. En effet, Sales (1977) a montré que dans le domaine de déformation linéaire et élastique, la charge à appliquer aux matériaux ne doit pas excéder le rapport de la charge linéaire sur la charge de rupture.

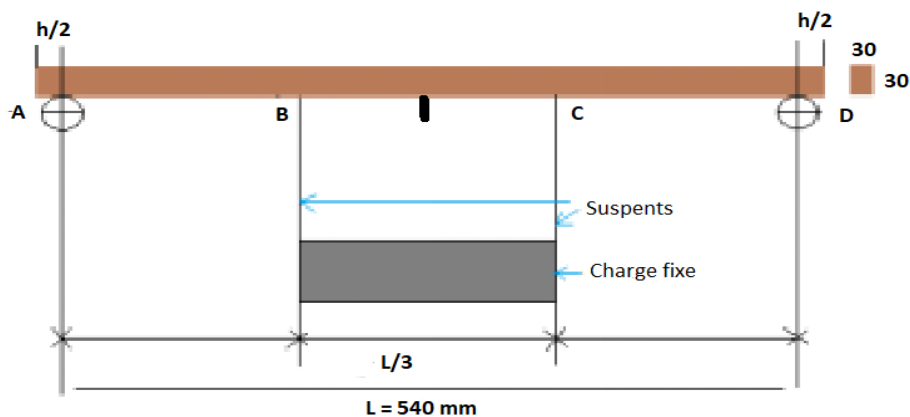


Fig. 2 : Dispositif de flexion 4 points

L'étude vise à évaluer l'effet de la température sur le comportement mécanique de l'Evino (*Vitex sp*), en conditions climatiques contrôlées. Ce travail a donc pour objectif d'observer comment le bois se comporte sous une charge mécanique, dans une chambre à conditions régulières (Température et Humidité), en fonction du temps.

### Résultats et discussion

Les essais permettant de la validation du dispositif visent à observer la variation de la température à l'intérieur du dispositif pour lequel il était convenu qu'il soit adiabatique même si quelques variations peuvent être perceptibles.

#### Comportement du dispositif quant à la température

Les courbes de la Fig. 3 traduisent les conditions environnementales du dispositif. Le constat est tel qu'il se produit des variations de température, qui cependant ne demeurent pas permanentes.

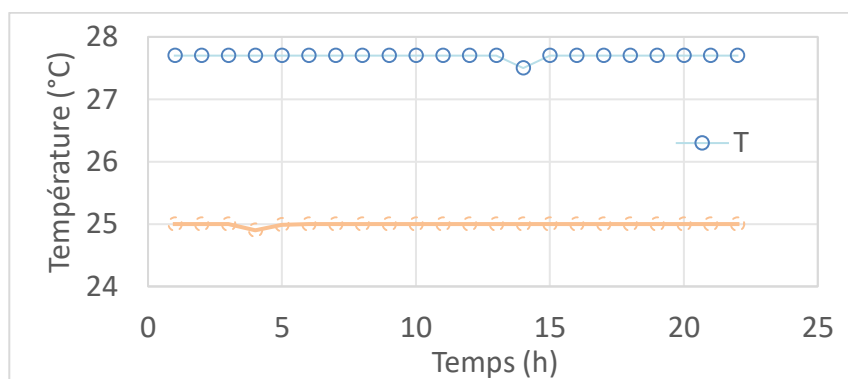


Fig. 3 : Propagation de la température en fonction du temps

#### Comportement des poutres soumis à une charge permanente en fonction la température

La réponse au chargement effectué est donnée par la figure ci-dessous (Fig. 4). Pour cette expérience, le taux d'humidité interne est de 12,29% pour une température de 27,7°C et une hygrométrie de 77,3% dans laquelle on y observe un fléchissement rapide des éprouvettes testées, dû à la charge imposée.

La validation du dispositif est conditionnée par le comportement de celui-ci vis des paramètres tels que l'humidité et la température, dont dépend très fortement le comportement du bois.

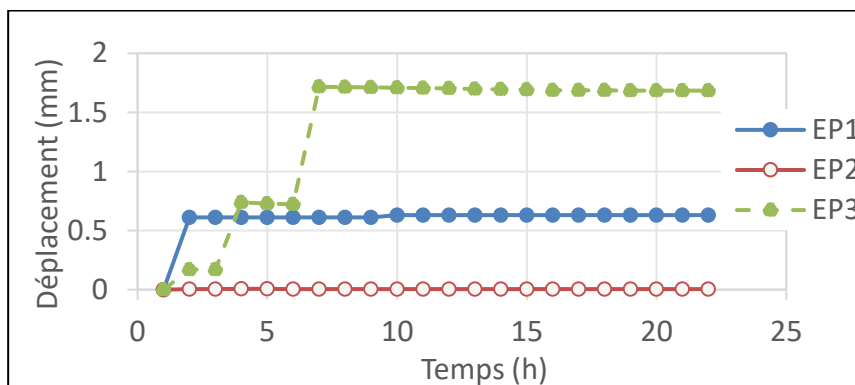


Fig. 4 : Evolution de la flèche pendant le chargement

### Conclusion et perspectives

La suite à donner à ces travaux réside dans la mise en évidence du comportement différé du bois d'Evino en fonction des effets couplés de la température et de l'humidité d'une part et de la détermination de l'énergie d'activation à partir du principe de superposition temps-température sur la base des courbes maîtresses.

### Remerciements

Mes remerciements s'adressent à l'École Nationale des Eaux et Forêts et particulièrement au directeur général pour les encouragements.

### Références

- Asseko Ella M, Pambou Nziengui C F, Ikogou S, Moutou Pitti R (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique de poutres entaillées d'essences européennes sous charges de fluage en conditions extérieures, 7<sup>ème</sup> conférence internationale sur l'ingénierie structurelles, la mécanique et le calcul SEMC2019.
- Daher H, Caré S, Forêt G, Payet L (2023) Effet de la température et de la teneur en eau sur le comportement mécanique du bois. Congrès des Jeunes Chercheurs en Mécanique (MECA-J), <https://mecaj2023.sciencesconf.org/resource/page/id/1>, France. <hal-04271025>, 2p.
- Détienne P, Jacquet P, Mariaux A (1982) Manuel d'identification des bois tropicaux CTFT, Tome 3, Guyanne française, p. 195-196.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, Cepadues, p. 99-127.
- Navi P, Herger F (2005) Comportement thermo-hygro-mécanique du bois Presses polytechniques et universitaires romandes, .
- Sales C (1977) Rheological studies of tropical wood, Revue Bois et Forêts, n° 176.
- Talla Fotsing G B (2021) Contribution à l'étude thermoélastique de quelques essences bois du Cameroun. Thèse de doctorat en mécanique, Université de Dschang, 108p.
- Varnier M (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus, des sciences du bois à l'ingénierie, Ph.D. thesis, Université de Limoges, 244p.

## Modélisation du comportement différé d'éléments en bois massif

QUEIDAT Nour El Hoda, COUREAU Jean-Luc, CHAPLAIN Myriam

Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux

[nour-el-hoda.oueidat@u-bordeaux.fr](mailto:nour-el-hoda.oueidat@u-bordeaux.fr)

**Mots clés :** bois massif ; nodosité ; caractérisation ; modélisation ; comportement viscoélastique ; hygromécanique ; endommagement ; durée de vie

### Contexte et objectifs

Le bois, matériau naturel largement utilisé en construction pour son caractère renouvelable, sa résistance, sa légèreté et sa durabilité. Il présente un comportement mécanique complexe en raison de son anisotropie et de ses propriétés variables. Les défauts tels que les nœuds et la déviation des fibres augmentent les difficultés à le modéliser.

L'hétérogénéité des matériaux et leurs performances différées doivent être intégrées dans les modélisations pour l'estimation des performances. L'endommagement des éléments structuraux en matériaux fibreux et hétérogènes, qu'il s'agisse de fissurations en surface, près de singularités ou au niveau des assemblages, affecte la performance des structures. Les risques de création ou de propagation de fissures augmentent lors des phases de séchage ou de changements rapides des conditions environnementales. Ces situations surviennent fréquemment lors de canicules (en lien avec le changement climatique), de chauffage ou de forte climatisation des bâtiments. La transition entre l'état humide et sec peut entraîner des variations dimensionnelles et des endommagements prématurés et localisés, réduisant la durée de vie des ouvrages, en particulier la tenue des éléments bois assemblés ou collés.

Ce travail vise à modéliser par une approche multiphysique l'endommagement du bois en tenant compte de leur teneur en eau sous chargement mécanique, afin d'estimer leur tenue dans le temps. Nous nous concentrerons particulièrement sur la modélisation des effets des variations des sollicitations extérieures sur la performance différée des constructions en bois. Le développement de ce modèle, associé à des essais de durée de vie en ambiance climatique maîtrisée, devra permettre de quantifier les cinétiques de ruptures et les choix des propriétés mécaniques et en lien avec l'hétérogénéité les plus influentes.

### Méthodologie

La première étape consiste à développer un modèle viscoélastique orthotrope pour le bois parfait. La deuxième étape vise ensuite à adapter ce modèle au bois de construction en intégrant les variations des pentes de fils (induits par les nœuds) dans le modèle initial. La troisième étape consiste à développer un modèle d'endommagement anisotrope à long terme pour le bois de construction, basé sur le modèle d'endommagement de Rebhi (2024) et des modèles viscoélastiques. Des essais expérimentaux spécifiques seront développés pour valider le modèle. L'effet de la teneur en eau sera aussi intégré dans le modèle d'endommagement. Le développement d'un modèle viscoélastique orthotrope est abordé dans le chapitre suivant.

### Modélisation viscoélastique orthotrope

Dans le domaine élastique, le comportement du bois peut être représenté par la loi de Hook généralisé. Pour un matériau homogène élastique orthotrope, la relation est donnée par l'équation (1) :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L^e \\ \varepsilon_T^e \\ \varepsilon_R^e \\ \gamma_{LT}^e \\ \gamma_{LR}^e \\ \gamma_{TR}^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L^0} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T^0} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R^0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T^0} & \frac{1}{E_T^0} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^0} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R^0} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^0} & \frac{1}{E_R^0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}^0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}^0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}^0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \end{Bmatrix} = [C^e] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Le comportement visqueux linéaire du bois peut être modélisé en utilisant des modèles rhéologiques à partir de deux éléments, le ressort (solide élastique) et l'amortisseur (fluide visqueux). Les deux modèles les plus utilisés sont le modèle de Kelvin Voigt plus particulièrement utilisé pour les essais de fluage-recouvrance, et le modèle de Maxwell pour les essais de relaxation-effacement.

Dans notre étude, pour représenter le comportement visqueux, le modèle rhéologique retenu par direction d'orthotropie est une cellule de Kelvin-Voigt (Fig. 1). Dans la première phase de l'étude, seule l'influence de la teneur en eau sera prise en compte, pas ses variations.

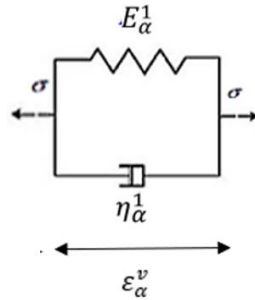


Fig. 1 : Représentation du modèle de Kelvin-Voigt selon la direction  $\alpha$  (avec  $\alpha=L, T$  ou  $R$ )

La déformation visqueuse selon la direction  $\alpha$  (avec  $\alpha=L, T$  ou  $R$ ) sous une charge constante  $\sigma_\alpha$  s'écrit suivant l'équation (2) et donc la déformation totale en fluage suivant l'équation (3).

$$\varepsilon_\alpha^v(t) = \sigma_\alpha \cdot \left[ \frac{1}{E_\alpha^1} \cdot (1 - e^{-t/\tau_\alpha^1}) \right] \quad \text{avec} \quad \tau_\alpha^1 = \frac{\eta_\alpha^1}{E_\alpha^1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\alpha(t) = \varepsilon_\alpha^e + \varepsilon_\alpha^v = \sigma_\alpha \cdot \left[ \frac{1}{E_\alpha^0} + \frac{1}{E_\alpha^1} \cdot (1 - e^{-t/\tau_\alpha^1}) \right] \quad (3)$$

La détermination des paramètres viscoélastiques pour le matériau orthotrope représente une tâche complexe, par manque de données dans la littérature. À partir des résultats expérimentaux de la thèse de Cariou (1987), les paramètres viscoélastiques dans la direction longitudinale du pin maritime pour une humidité de 12% sont obtenus. La méthode d'ajustement repose sur une approche de moindres carrés, visant à minimiser la somme des carrés des écarts entre les données de Cariou (1987) et l'équation 2 (Fig. 2). Les valeurs obtenues,  $1,069 \cdot 10^4$  MPa et  $1,387 \cdot 10^4$  MPa.h correspondent respectivement à  $E_L^1$  et  $\eta_L^1$ .

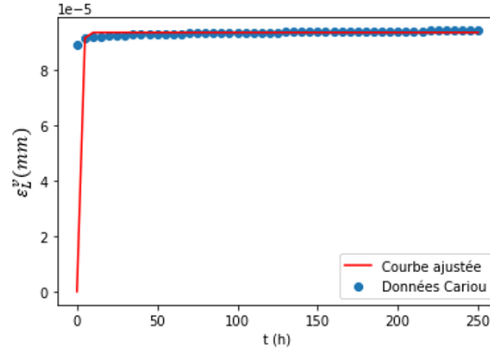


Fig. 2 : Évolution de la déformation viscoélastique longitudinale en fonction du temps

Nous ne connaissons que très peu les paramètres viscoélastiques pour les autres directions. Selon Guitard (1987), nous supposons dans un premier temps que les facteurs d'orthotropie ( $C_i$ , Eq. 4) restent constants au cours du temps selon les directions, en considérant les degrés d'anisotropie connus en élasticité. Sur la base de ces hypothèses, les modules de Young ainsi que les modules de cisaillement seront exprimés en fonction de  $E_L^0$  ou  $E_L^1$  comme présenté équation (4).

$$\frac{E_R^0}{E_L^0} = \frac{E_R^1}{E_L^1} = C_1 ; \frac{E_T^0}{E_L^0} = \frac{E_T^1}{E_L^1} = C_2 ; \frac{G_{TR}^0}{E_L^0} = \frac{G_{TR}^1}{E_L^1} = C_3 ; \frac{G_{LR}^0}{E_L^0} = \frac{G_{LR}^1}{E_L^1} = C_4 ; \frac{G_{LT}^0}{E_L^0} = \frac{G_{LT}^1}{E_L^1} = C_5 \quad (4)$$

avec  $C_i$  : constantes dépendantes du bois étudié.

Également par manque de données, le rapport  $\tau_\alpha^1$  du modèle de Kelvin Voigt est considéré dans cette première phase comme constant et identique dans toutes les directions ( $\tau_\alpha^1 = \tau_L^1$ ),  $\tau_L^1$  étant le seul déterminé suivant la direction longitudinale. La matrice de complaisance viscoélastique pour le cas orthotrope peut s'écrire de façon simplifiée suivante :

$$[C^v] = \left(1 - e^{-t/\tau_L^1}\right) \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L^1} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T^1} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T^1} & \frac{1}{E_T^1} & \frac{-\nu_{TR}}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R^1} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T^1} & \frac{1}{E_R^1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{LT}^0 \cdot E_L^1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{LR}^0 \cdot E_L^1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_L^0}{G_{TR}^0 \cdot E_L^1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cette matrice de complaisance viscoélastique  $[C^v]$ , avec les hypothèses de l'équation (4), s'exprime alors en fonction de la matrice de complaisance élastique par la relation suivante :

$$[C^v] = \frac{\left(1 - e^{-t/\tau_L^1}\right) \cdot E_L^0}{E_L^1} [C^e] \quad (6)$$

Cette proposition de modèle sera implémentée sous Cast3M développeur. L'extension du modèle viscoélastique au bois de construction consiste à intégrer la variation locale des propriétés élastiques due à la présence des nœuds (variation de l'orientation des fils du bois). La distribution de ces propriétés est déterminée à l'aide des formules de Guitard (1987). Le modèle géométrique d'une poutre en bois avec ses nœuds est créé sur Cast3M (Rebhi, 2024). Une fois le maillage réalisé, nous pourrions étudier le comportement macroscopique des poutres de structures idéalisées. Le modèle sera ensuite testé sur plusieurs configurations d'hétérogénéités.

## Protocole expérimental

Avant les essais de fluage, la variation de la pente de fils est mesurée à l'aide d'un dispositif laser (Xyloprofil) qui projette une ligne de points laser perpendiculaire à l'axe longitudinal du bois, tout en déplaçant le faisceau longitudinalement (Fig. 3). Ensuite, la poutre sera modélisée en intégrant les pentes des fils dans le modèle viscoélastique, à l'aide du modèle développé par Rebhi dans le cadre de sa thèse (Rebhi 2024). Ce modèle permet de déterminer la variation locale des propriétés élastiques due à des nœuds (Fig. 4).



Fig. 3 : Scan du bois avec le Xyloprofil et mesure de la variation de la pente de fil (Rebhi et al 2023)

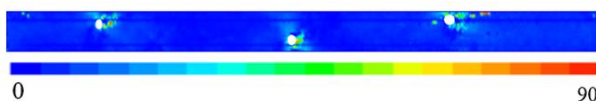


Fig. 4 : Exemple de cartographies d'angles d'orientations des fils d'une face d'une poutre de pin maritime

Pour valider les estimations par simulation numérique, des essais sous charge constante seront effectués sur des éléments en bois massif. Ces essais seront réalisés sous un environnement contrôlé, dans une enceinte climatique de 20 m<sup>2</sup>, où la température et l'humidité relative de l'air seront contrôlées. La charge appliquée correspondra à 85% de la contrainte à la rupture, déterminée à partir du modèle d'endommagement. Ce niveau de charge a été choisi afin de réduire la durée des essais de fluage. L'analyse post essais des champs de déformation avec le modèle numérique sera réalisée au niveau de la nodosité pour étudier la pertinence des modèles implémentés qui seront ensuite modifiés si non convergence modèle-essais.

## Conclusion

Cette recherche représente la première phase de la thèse dédiée à la modélisation du comportement viscoélastique du bois massif qui présente des défauts. Elle met en évidence les données essentielles et propose une loi de comportement ainsi que le protocole expérimental nécessaire pour réaliser et valider les simulations. En conclusion, un modèle d'endommagement anisotrope à long terme pour le bois massif sera développé, apportant une contribution originale dans le domaine de bois de construction, puisque le sujet de l'endommagement-fluage du bois massif avec des défauts est traité que très rarement.

## Références

- Rebhi A (2024) Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : Application au bois massif, thèse de l'université de Bordeaux.
- Cariou J-L (1987) Caractérisation d'un matériau viscoélastique anisotrope : le bois, thèse de l'université Bordeaux 1.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, édition Cépaduès, 238p.
- Rebhi A, Chaplain M, Coureau J-L, Perez C (2023) Damage model for a biosourced heterogeneous material: application to timber, World Conference on Timber Engineering 19-22.06.23, Oslo, Norway, p. 209–215.

## Résumés – Session C

## Capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes pour l'usinage du bois massif

NASRI Linda, CURTI Rémi, LARRICQ Pierre, EYMA Florent

Institut Clément Ader (ICA) ; Université de Toulouse ; CNRS, IMT Mines Albi, UPS, INSA, ISAE-SUPAERO ; IUT de Tarbes, 1 Rue Lautréamont, 65000 Tarbes, France

[linda.nasri@iut-tarbes.fr](mailto:linda.nasri@iut-tarbes.fr)

**Mots clés :** usinage ; robot ; chêne ; sapin ; qualité dimensionnelle et géométrique ; état de surface

### Contexte et objectifs

A une époque où les évolutions technologiques sont de plus en plus prégnantes, la robotique industrielle émerge comme l'une des technologies les plus influentes sur divers secteurs. Les robots industriels sont à la pointe de la technologie dans les industries électronique et automobile par rapport à d'autres secteurs tels que les métaux et machinerie (IFR 2022). L'utilisation des robots industriels dans les procédés d'usinage ne cesse d'augmenter dans le monde entier et les prévisions indiquent qu'elle continuera à croître (Iglesias et al 2015). Les robots industriels sont utilisés dans les procédés d'usinage car ils présentent de nombreux avantages, tels que : de grands espaces de travail, un nombre de degré de liberté (DDL) élevé, une grande flexibilité et un coût à l'investissement inférieur à celui des machines à commande numérique (Computer Numerical Control / CNC) (Kim et al 2019, Xu et al 2023). Pour autant, bien que les robots industriels présentent de nombreux avantages, seulement 0,2% de tous les robots industriels dans le monde sont utilisés dans les procédés d'usinage du bois d'après (Landscheidt et al. 2017), notamment du fait de leur faible précision d'usinage (Kim et al 2019). La rigidité du robot est le paramètre clé qui influence cette précision (Verl et al 2019). La structure sérielle du robot poly-articulé présente une rigidité inférieure à celle d'une machine CNC. La rigidité d'un robot poly-articulé est généralement inférieure à 1 N/ $\mu$ m, tandis qu'une machine CNC standard a très souvent une rigidité supérieure à 50 N/ $\mu$ m (Pan et al 2006). Pour la seconde transformation du bois, la précision recherchée est, pour une grande variété d'applications, moins contraignante qu'en usinage des métaux. Aussi, il est donc intéressant de déterminer le potentiel de cette technologie pour ces applications où les limitations impliquées par la robustesse du procédé d'usinage auront potentiellement moins d'impact sur le produit fini. Dans la littérature, quelques études ont déjà été menées pour comparer la qualité d'usinage obtenue lors de l'usinage robotisé à celle obtenue avec une machine CNC.

Généralement, la qualité de surface est équivalente ou meilleure en usinage sur machine CNC qu'avec un robot. Ce constat a été fait par (Behrang 2014) sur de l'aluminium ou (Slamani et al 2016) sur du composite stratifié.

En termes de qualité dimensionnelle, elle est systématiquement supérieure sur machine à commande numérique en usinage des matériaux métalliques à paramètres équivalents. (Pantscharowitsch et Kromoser 2022) ont montré que c'était également le cas en usinage du bois lamellé-collé.

Par ailleurs, il est notable qu'en usinage robotisé, la configuration du robot a elle aussi une influence sur la qualité dimensionnelle ainsi que sur la qualité de surface (Feng et al 2021, Xu et al 2023). Ces deux critères pouvant être importants en fonction de la destination des bois usinés (construction, menuiserie ou ameublement).



En usinage du bois massif, on ne trouve pas encore d'évaluation de la qualité issue d'un usinage robotisé. Obtenir une qualité de surface acceptable du bois est l'objectif principal de tous les processus d'usinage pour toutes les applications (Ramanakoto et al 2017). L'évaluation de cette qualité d'usinage du bois à l'aide d'un robot poly-articulé, est donc nécessaire. La précision dimensionnelle, la qualité de surface ainsi que la qualité géométrique de la pièce produite sont les principaux critères d'évaluation permettant de déterminer la capacité d'un robot en usinage (Ji et Wang 2019). Les objectifs de ces travaux de recherche sont donc d'évaluer la capacité d'un robot poly-articulé 6-axes en usinage du bois, en comparant les résultats obtenus avec la référence actuelle dans l'industrie de la seconde transformation du bois, à savoir la défonceuse à commande numérique ; et ce, à la fois en termes de (1) qualité dimensionnelle, (2) qualité géométrique et (3) d'état de surface.

### Matériels et méthodes

Afin d'évaluer la capacité d'un robot polyarticulé 6 axes à usiner du bois massif, nous avons choisi deux essences de bois locales présentes, entre autres, dans le sud-ouest de la France : un bois feuillu, le chêne, et un bois résineux, le sapin. Les éprouvettes en sapin (Fig. 1) mesurant chacune  $200 \times 180 \times 19 \text{ mm}^3$ , et en chêne (Fig. 2) mesurant chacune  $200 \times 180 \times 36 \text{ mm}^3$ . Toutes les éprouvettes ont été débitées sur faux-quartier.



Fig. 1 : Epreuve en sapin



Fig.2 : Epreuve en chêne

L'usinage des éprouvettes a été effectué à l'aide de deux machines. D'une part, un robot 6 axes (Kuka Kr 70) avec une charge admissible maximale de 70 kg, une portée maximale de 2101 mm et une répétabilité de position donnée à  $\pm 0,05 \text{ mm}$ , équipé d'une électrobroche d'usinage (HSD MT 1090 HSK A40). D'autre part, une défonceuse à commande numérique (Dubus 3 axes). Sur le robot d'usinage, 5 positions d'usinage (Fig. 3) ont été testées pour placer le robot dans des conditions différentes afin de déterminer l'influence de la position de ses axes. Ces essais ont été répétés 5 fois pour un total de 25 éprouvettes de chaque essence. Sur la défonceuse, une seule position a été utilisée, centrale sur la table de travail, pour servir de point de comparaison. Cet essai a également été répété 5 fois. Au total 30 éprouvettes ont donc été usinées pour chaque essence, dont 25 éprouvettes à l'aide du robot et 5 éprouvettes avec la défonceuse. Les éprouvettes ont toutes été usinées avec les mêmes paramètres de coupe caractéristiques d'un usinage en ébauche soignée (vitesse de rotation : 15000 tr/min ; vitesse de coupe : 12,57 m/s ; vitesse d'avance : 10 m/min ; vitesse d'avance en plongée : 0,5 m/min ; engagement axiale en surfacage : 3 mm ; engagement radiale en contournage : 3 mm). L'outil de coupe utilisé est une fraise à 2 dents en acier rapide, de diamètre 16 mm et possédant un

angle d'hélice de 30°. L'évaluation de la capabilité du robot pour l'usinage a été effectuée à travers trois types de contrôles (Fig. 4).

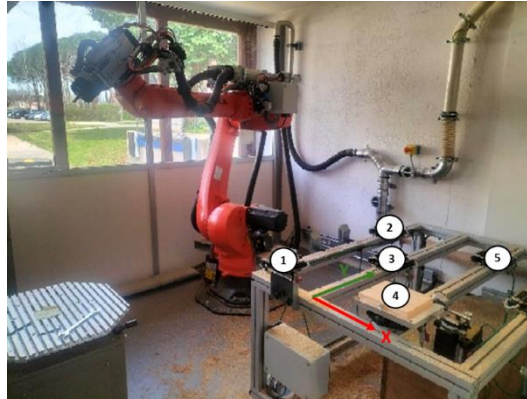


Fig. 3 : Illustration des cinq positions d'usinage avec le robot

Le contrôle dimensionnel consiste à déterminer l'écart entre les dimensions nominales des échantillons et leurs dimensions réelles après usinage (longueurs, profondeurs, entraxes). Pour chaque cote, l'erreur absolue moyenne (MAE) a été calculée, à la fois pour les usinages avec la défonceuse et pour chaque position en usinage avec le robot. Le contrôle géométrique permet d'évaluer des spécifications géométriques telles que la planéité, le parallélisme, la perpendicularité et la localisation. De même, pour chaque spécification géométrique l'erreur moyenne a été déterminée, en usinage avec la défonceuse et pour chaque position en usinage robotisé. Ces contrôles ont été effectués à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT DEA GAMMA 1203). Nous avons ensuite comparé les états de surface obtenus avec le robot à ceux obtenus avec la défonceuse. Plusieurs paramètres d'états de surface ont été mesurés à cette fin à l'aide d'un perthomètre Mahr (MarSurf CM mobile).

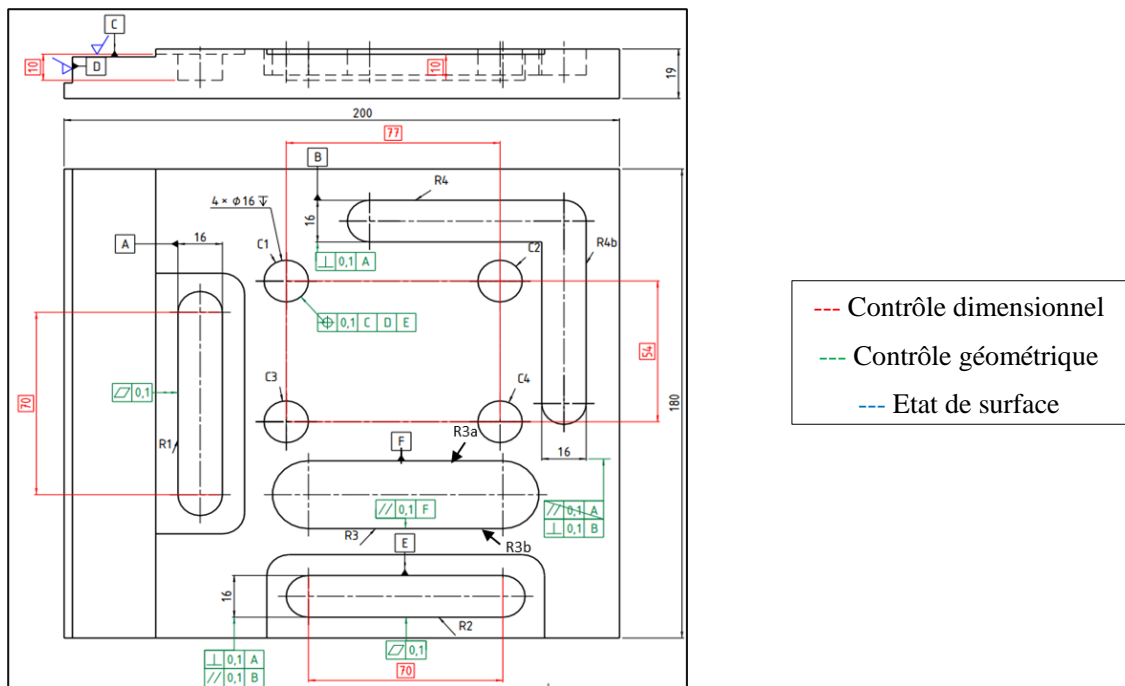


Fig. 4 : Dimensions, spécifications géométriques et états de surface contrôlés

## Résultats

Ces essais nous ont permis d'évaluer la qualité dimensionnelle, géométrique et l'état de surface en usinage robotisé du bois (pour du chêne et du sapin), tout en comparant ces derniers aux résultats obtenus avec la défonceuse à commande numérique. Dans cette section, nous ne présentons qu'un résultat par type de contrôle. La qualité dimensionnelle obtenue en usinage avec la défonceuse est généralement meilleure qu'en usinage avec le robot. Toutefois, certaines configurations du robot permettent d'avoir des qualités dimensionnelles comparables à celles obtenues en usinage avec la défonceuse. Que ce soit sur le chêne ou le sapin, les résultats obtenus avec le robot montrent que les écarts sur les longueurs ne dépassent pas 0,3 mm (Fig. 5), les écarts sur les profondeurs ne dépassent pas 0,35 mm et les écarts sur les entraxes ne dépassent pas 0,25 mm. La qualité géométrique est elle aussi généralement supérieure en usinage avec la défonceuse qu'en usinage avec le robot. Cependant, certaines configurations en usinage robotisé permettent également d'atteindre une qualité géométrique comparable. Pour les deux essences, les résultats obtenus avec le robot montrent que le défaut de planéité ne dépasse pas 0,3 mm, le défaut de parallélisme ne dépasse pas 0,3 mm (Fig. 6), le défaut de perpendicularité est généralement inférieur à 0,5 mm sauf sur certaines positions, et que le défaut de localisation est inférieur à 0,3 mm.

Globalement, en termes de répétabilité, la différence entre le plus grand et le plus petit écart dimensionnel et géométrique sur une position donnée est de l'ordre d'un dixième de mm, sauf quelques points aberrants.

En termes d'état de surface, les résultats du paramètre de rugosité  $S_a$  (hauteur moyenne arithmétique) en usinage robotisé sont similaires à ceux obtenus avec la défonceuse (Fig. 7). De plus, la configuration du robot n'a pas influencé significativement l'état de surface lors de l'usinage du bois pour les deux essences étudiées.

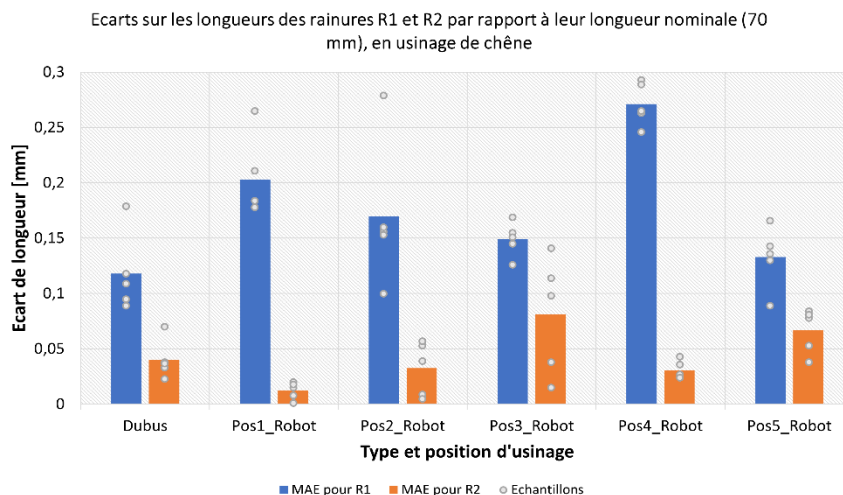


Fig.5 : Résultats de contrôle de longueurs pour l'usinage du chêne

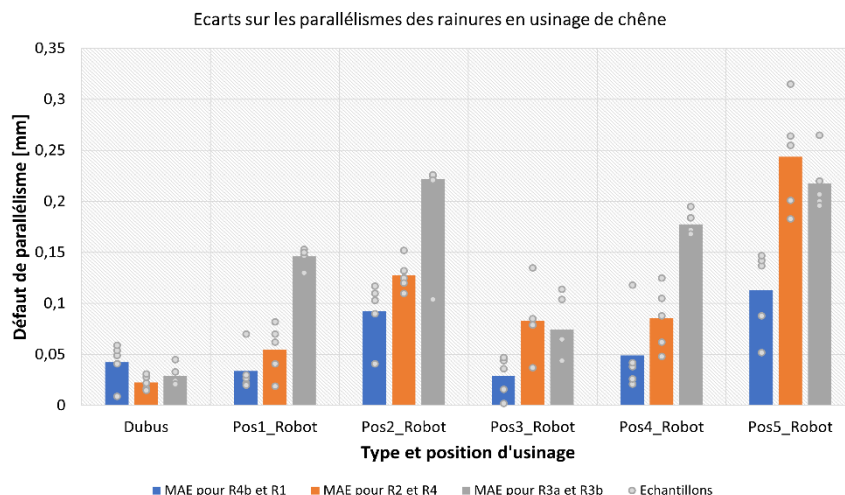


Fig.6 : Résultats des défauts de parallélisme pour l'usinage du chêne

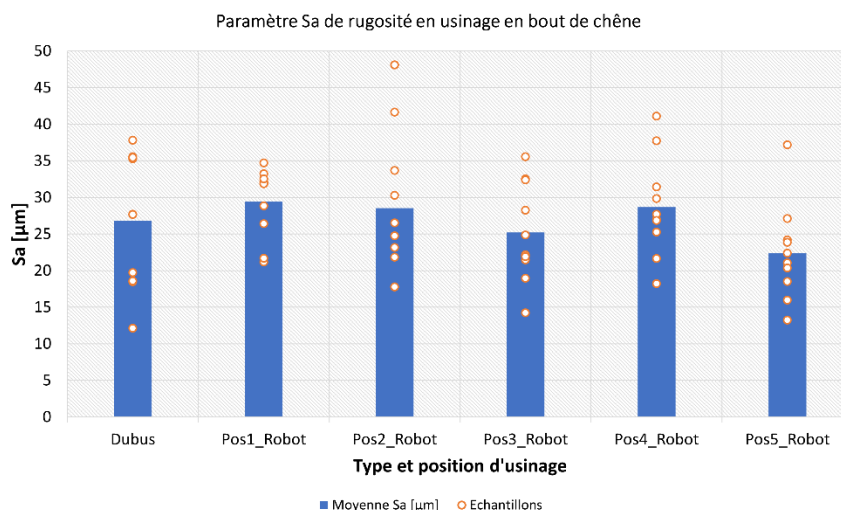


Fig.7 : Résultats de paramètre Sa (hauteur moyenne arithmétique) de rugosité pour l'usinage en bout du chêne

## Conclusion et perspectives

Dans ces travaux de recherche nous avons évalué la capacité d'un robot polyarticulé 6 axes en usinage du bois massif sur du sapin et du chêne en termes de qualité dimensionnelle, géométrique et d'états de surface, en prenant comme référence une défonceuse à commande numérique. Nos résultats constituent une première étape dans la compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'un usinage robotisé, et permettent d'appréhender la qualité que l'on peut atteindre en usinage du bois à l'aide d'un robot ainsi que les potentielles applications en fonction de leurs tolérances. Par la suite, notre objectif est d'étudier le lien entre les états de surface du bois usiné sous différentes orientations et des signaux mesurés durant l'usinage (efforts de coupe, émission acoustique). Cela permettra d'estimer la qualité de surface du bois usiné par l'observation de ces signaux, et par conséquent, d'identifier les zones présentant un état de surface satisfaisant vis-à-vis d'un objectif donné et celles présentant un état de surface nécessitant un parachèvement.

## Remerciements

Nous souhaitons remercier l'agglomération de Tarbes Lourdes Pyrénées, l'IUT de Tarbes et la Région Occitanie pour leur support financier.

## Références

- Behrang M (2014) Robotic machining: Evaluation of the positioning accuracy and the machined surface quality, thèse de l'université du Québec.
- Feng L, Zhao W, Zhang Z, Yan P, Cheng M, Jiao L, Qiu T (2021) Effect of Postures and Cutting Process on Robot Milling Performance and Surface Quality. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, p. 639-647. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89098-8\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89098-8_60)
- IFR (International Federation of Robotics) (2022) World robotics 2022—Industrial robots.
- Iglesias I, Sebastián MA, Ares JE (2015) Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential. *Procedia Engineering*, 132:911-917. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.577>
- Ji W, Wang L (2019) Industrial robotic machining: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1-4):1239-1255. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
- Kim SH, Nam E, Ha TI, Hwang SH, Lee JH, Park SH, Min BK (2019) Robotic Machining: A Review of Recent Progress. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(9):1629-1642. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00187-w>
- Landscheidt S, Kans M, Winroth M (2017) Opportunities for Robotic Automation in Wood Product Industries: The Supplier and System Integrators Perspective. *Procedia Manufacturing*, 11:233-240. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.231>
- Pan Z, Zhang H, Zhu Z, Wang J (2006) Chatter analysis of robotic machining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3):301-309. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>
- Pantscharowitsch M, Kromoser B (2022) Investigation of industrial robots vs joinery machines for milling pockets in glulam: Comparison based on surface quality and 3D scans. *Civil Engineering Design*, 4(1-3):25-34. <https://doi.org/10.1002/cend.202100049>
- Ramanakoto MF, Andrianantenaina AN, Ramananantoandro T, Eyma F (2017) Visual and visuo-tactile preferences of Malagasy consumers for machined wood surfaces for furniture: Acceptability thresholds for surface parameters. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(5):825-837. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1098-y>
- Slamani M, Gauthier S, Chatelain JF (2016) Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42:63-72. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.05.004>
- Verl A, Valente A, Melkote S, Brecher C, Ozturk E, Tunc LT (2019) Robots in machining. *CIRP Annals*, 68(2):799-822. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.009>
- Xu P, Gao Y, Yao X, Ng YH, Liu K, Bi G (2023) Influence of process parameters and robot postures on surface quality in robotic machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7-8):2545-2561. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10640-2>

## Caractérisation expérimentale et modélisation de lamelles aboutées-panneautées de chêne homogénéisées

CORDEIRO Silva<sup>1,2</sup>, SOH MBOU Delin<sup>1</sup>, POT Guillaume<sup>1</sup>, MARCON Bertrand<sup>1</sup>,  
VIGUIER Joffrey<sup>1</sup>, MILHE Louis<sup>1</sup>, CHASTAGNIER Thibault<sup>3</sup>, LOUVET Thibaut<sup>3</sup>,  
LANVIN Jean-Denis<sup>4</sup>, REULING Didier<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, F-71250 Cluny, France

<sup>2</sup>Master Génie mécanique et matériaux, Université Bretagne Sud, Lorient, France

<sup>3</sup>Ducerf Groupe, Le Bourg, 71120 Vendennes-lès-Charolles, France

<sup>4</sup>FCBA, Allée de Boutaut BP227, 33028 Bordeaux, France.

[silvcordeiro2019@gmail.com](mailto:silvcordeiro2019@gmail.com)

**Mots clés :** Feuillus, Bois de Qualité Secondaire, Propriétés mécaniques, Lamellé-collé, Traction, Modélisation numérique

### Contexte et Objectifs

Le bois, en tant que matériau naturel et renouvelable, joue un rôle important dans les secteurs de la construction et du mobilier. Parmi les différentes essences de bois, le chêne se distingue historiquement pour sa robustesse et sa longévité, faisant de lui un choix privilégié dans ces industries. Cependant, son utilisation dans la construction a diminué au fil des ans, bien que les chênes sessile et pédonculé demeurent la première ressource de bois en France métropolitaine (23 % du volume de bois sur pied à l'horizon 2035, Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques, FCBA 2019).

Les bois feuillus, tels que le chêne, posent des défis particuliers lors de leur utilisation dans des applications structurales, notamment en raison de leur hétérogénéité marquée. Contrairement aux bois résineux, qui sont plus homogènes et plus faciles à travailler, les lamelles de feuillus utilisées dans les lamellé-collés présentent un plus grand nombre d'aboutages par entures (comme illustré dans la Fig. 1b). De plus, les contraintes de coût matière limitent aussi la largeur des courçons les constituant. Afin de produire des poutres de lamellé-collé suffisamment larges, une solution est de panneauter dans la largeur pour obtenir des lamelles aboutées-panneautées (LAP).

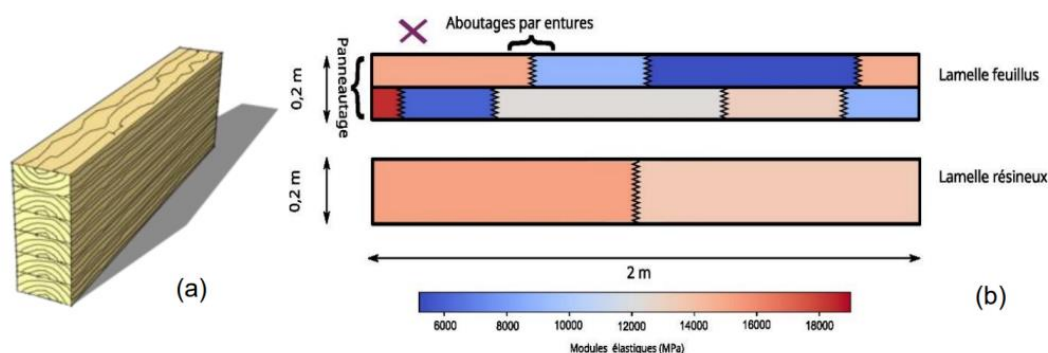


Fig. 1 : (a) Schéma d'une poutre lamellé-collé. (b) Comparaison schématique entre une lamelle aboutée-panneautée de bois feuillus (en haut) et une lamelle de résineux (en bas), la couleur représentant le module élastique (Soh Mbou et al. 2023).

Une étude antérieure menée par Soh Mbou et al. (2023), purement numérique, a mis en lumière un problème possible des lamelles aboutées-panneautées en chêne en raison d'une hétérogénéité des contraintes significative sous sollicitation de traction (la sollicitation limitante pour le lamellé-collé – cf. EN 14080 2013). Cette hétérogénéité entraînerait des concentrations de contraintes locales (ou, « surcontraintes ») pouvant dépasser de 40 % la contrainte moyenne, compromettant la performance structurelle globale. Selon Soh Mbou et al. (2023), un tri préalable des courçons, basé sur leurs modules d'élasticité longitudinal (MOE), permettrait de réduire ces concentrations de contrainte de moitié.

Ce travail vise à approfondir ces précédents résultats à travers des essais expérimentaux comparés à une modélisation numérique, en se focalisant sur l'impact de l'hétérogénéité des lamelles sur la performance mécanique des LAP de bois feuillus. L'objectif principal est d'explorer comment ces variations internes de MOE influencent la résistance mécanique des LAP et d'identifier des moyens non-destructifs pour améliorer leurs caractéristiques dans un contexte de production à partir de bois de qualité secondaire.

## Matériels et Méthodes

### *Tri et fabrication des LAP*

À partir d'un ensemble de 365 courçons de chêne sessile ou pédonculé de section  $21 \times 105 \text{ mm}^2$ , 29 LAP de dimensions  $19,5 \times 200 \times 3000 \text{ mm}^3$  ont été fabriquées en vue d'être testées. La sélection des courçons a été réalisée en fonction de leur MOE mesuré de façon non destructive par méthode vibratoire (BING®, CIRAD, Paradis et al. 2017). Ainsi, comme le montre la Fig. 2a, la valeur de référence médiane du groupe d'éprouvettes testé est de 12,8 GPa. Les courçons présentant un MOE inférieur à cette valeur, 96 courçons ont été classés comme "faibles", tandis que ceux ayant un MOE supérieur à cette valeur, 109 courçons ont été considérés comme "forts". Les 160 courçons restants forment un troisième groupe composé de courçons sans sélection particulière, dénommé « aléatoire ».

Les courçons ont ensuite été assemblés pour former trois types de LAP : 8 LAP "faibles" (composés de courçons avec un MOE faible), 9 LAP "fortes" (composés de courçons avec un MOE élevé) et enfin 12 LAP "aléatoires".

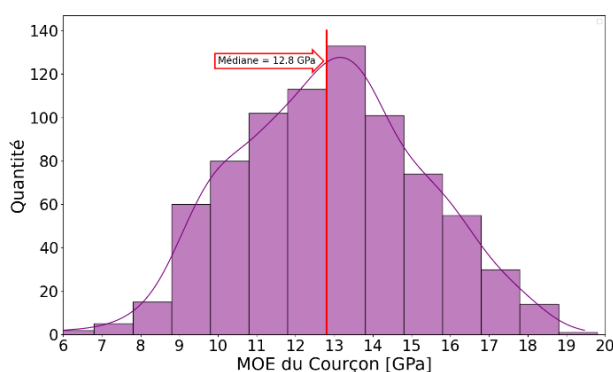


Fig. 2a - Distribution de MOE longitudinal des courçons

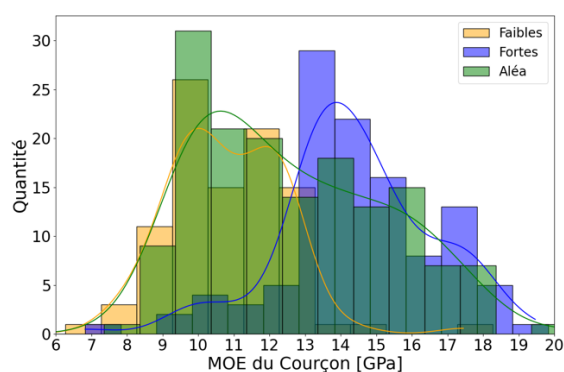


Fig. 2b - Distribution des MOE Longitudinal des courçons utilisés pour la fabrication des LAP

La Fig. 2b montre la distribution du MOE des courçons selon les LAP fabriquées. La superposition des courbes de distribution révèle que les LAP "faibles" et "fortes" sont plus homogènes, comme le montre la faible dispersion des MOE autour de leurs médianes respectives. En revanche, les LAP "aléatoires" affichent une distribution plus étendue, indiquant une plus grande variabilité dans la composition des courçons.

### Essais de Traction

Les essais de traction ont été effectués afin d'évaluer la résistance mécanique des 29 LAP et d'analyser l'impact du tri effectué sur les courçons. La Fig. 3 illustre le dispositif d'essai, dans lequel chaque panneau, d'une longueur totale de 3000 mm, est soumis à une force de traction  $F$ . L'objectif est de faire en sorte que le maximum d'aboutages présents dans les LAP soit testés. Les extrémités des LAP sont maintenues dans des mors longs de 300 mm, ce qui assure une zone de test utile de 2400 mm au centre du panneau.

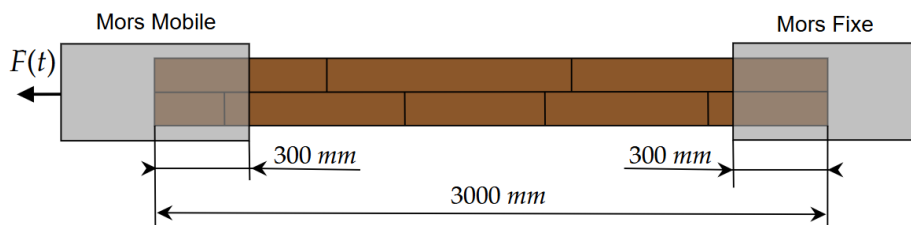


Fig. 3 : Configuration d'essai - Le panneau de 3 m mais le longueur testée hors mors est de 2,4 m

En parallèle, un système de stéréo-corrélation d'images (StrainMaster, LaVision©) a été installé pour observer l'évolution des déformations tout au long du panneau pendant les essais. Ce système permet une analyse précise de l'hétérogénéité des LAP, notamment en identifiant les zones les plus déformées en raison des variations de MOE. Des extensomètres virtuels intégrés dans le logiciel DaVis (LaVision©) ont été utilisés pour des mesures précises des déformations des LAP, permettant de remonter aux MOE « statiques » locaux, garantissant une analyse complète des propriétés mécaniques des LAP.

### Modélisation Numérique

Une modélisation par éléments finis a été réalisée pour simuler les essais de traction et analyser la répartition des déformations et contraintes dans les LAP. Le modèle, de type orthotrope, prend en compte les propriétés mécaniques différenciées du matériau dans les trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle), reflétant ainsi la nature anisotrope du bois. Cependant, chaque courçon est considéré comme étant homogène. Les singularités telles que les nœuds ou autres défauts locaux n'ont pas été incluses, et les liaisons entre les courçons (aboutage comme panneau) ont été modélisés comme des liaisons parfaites (voir Fig. 4).

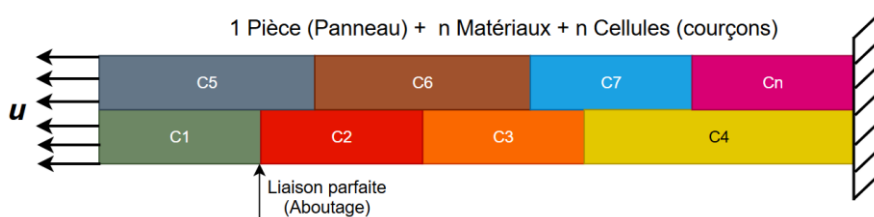


Fig. 4 : Modélisation éléments finis sur Abaqus™, avec n courçons homogènes pour n propriétés matériau associées

Les propriétés mécaniques utilisées dans le modèle ont été déterminées à partir des valeurs de MOE issues de l'analyse vibratoire non destructive pour chaque courçon. Le module longitudinal a été pris égal au MOE vibratoire, tandis que les modules d'élasticité dans les directions radiale et tangentielle, ainsi que les modules de cisaillement, ont été calculées à l'aide des rapports indiqués par Kretschmann (2010) pour le chêne blanc. A partir des résultats du calcul du modèle éléments finis, un indicateur de l'hétérogénéité des contraintes a été calculé, le Rapport de Sur-Contraintes (RSC), analogue à un coefficient de concentration de contrainte. Il est calculé par le rapport entre la contrainte de traction moyenne ( $\sigma_{moyenne}$ ) appliquée sur tout le panneau et la contrainte longitudinale maximale ( $\sigma_{Max}$ ) comme indiqué par l'Equation



1. Une étude de convergence a été menée vis-à-vis du nombre d'éléments afin d'avoir un maximum de contrainte déterminé correctement et non dépendant du maillage (éléments hexaédriques de côté 6 mm à interpolation quadratique). La Fig. 5 montre la répartition des contraintes sur un panneau mettant bien en évidence l'hétérogénéité et la concentration de contrainte pouvant exister entre courçons contigus.

$$RSC = \frac{\sigma_{Max}}{\sigma_{moyenne}} \quad \text{Equation 1}$$

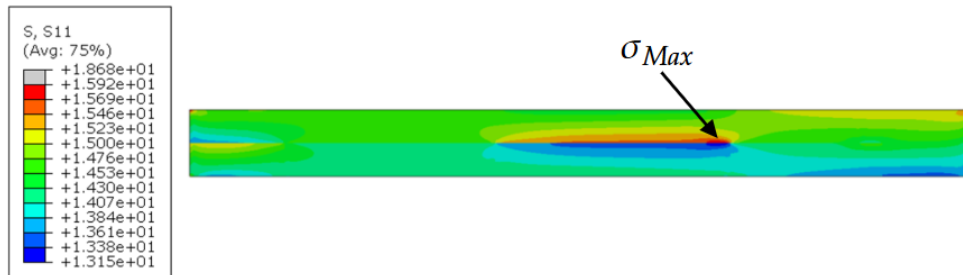


Fig. 5 : Exemple de répartition des contraintes longitudinales sur un panneau et zone de contrainte maximale où le RSC sera également maximal

## Résultats et discussions

Les résultats pour l'ensemble des LAP en termes de MOE et de résistance sont présentés Fig. 6a et 6b. En comparant en détails les trois lots de LAP (faible, fort, aléatoire), plusieurs observations importantes peuvent être faites :

- Lot Fort : Les LAP composées de courçons avec un MOE élevé présentent une distribution de résistance relativement resserrée, avec des valeurs globalement plus élevées, ce qui indique une meilleure résistance mécanique et une plus grande homogénéité.
- Lot Aléatoire : Ce lot présente la plus grande dispersion des valeurs de résistance ainsi que les valeurs les plus faibles. L'absence de tri rigoureux selon le MOE se traduit par une variabilité accrue des propriétés mécaniques, rendant les LAP plus imprévisibles en termes de résistance.
- Lot Faible : Bien qu'ayant des valeurs de MOE de courçons plus faibles que pour les LAP aléatoires, les valeurs de résistance sont plus grandes. Elles restent cependant inférieures au lot fort.

L'homogénéité des LAP apparaît donc comme un facteur primordial dans l'explication de leur résistance en traction. Par conséquent, la corrélation entre le MOE des LAP et leur résistance (Fig. 6b) se révèle très faible ( $R^2 = 0.1$ ), contrairement au comportement habituel du matériau bois. Cette relation n'est donc pas assez précise pour prédire la résistance des LAP de manière fiable.

L'indicateur RSC apparaît plus pertinent pour évaluer la résistance des LAP (Fig. 7). En effet, les LAP présentant un RSC plus faible tendent à être plus homogènes, et donc à avoir une résistance plus élevée. En revanche, la zone rouge dans la Fig. 7 représente une région où les LAP auraient résisté moins que prévu par rapport à leur RSC. Aucun panneau n'est effectivement situé dans la zone rouge, cela confirme que l'utilisation du RSC comme indicateur est un outil efficace pour mieux anticiper les performances mécaniques, surtout dans des contextes où le MOE seul ne donne pas une image complète de la résistance du matériau.

D'un point de vue technologique, il est essentiel de noter que les LAP du lot aléatoire présentaient une résistance caractéristique de 11,3 MPa, contre 17,7 MPa pour les LAP du lot

faible et 20,2 MPa pour celles du lot fort. Or, la valeur cible était de 14 MPa (équivalent de résistance en traction de la classe D24), ce qui illustre bien l'importance capitale de l'homogénéité de ces LAP pour bien valoriser la ressource utilisée.

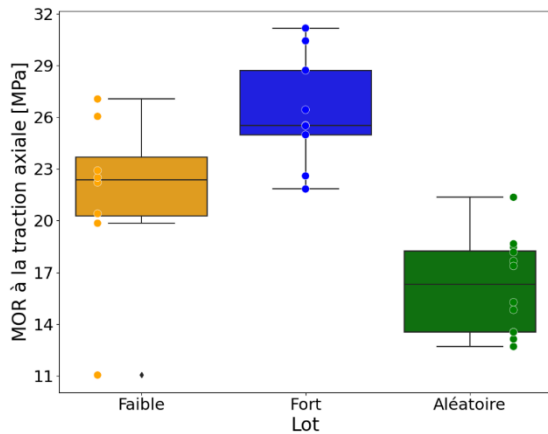


Fig. 6a : Distribution de MOR de chaque lot

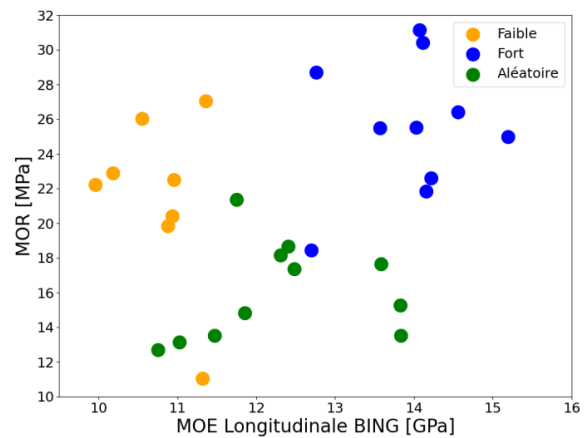


Fig. 6b : Relation entre MOR et MOE longitudinale des LAP

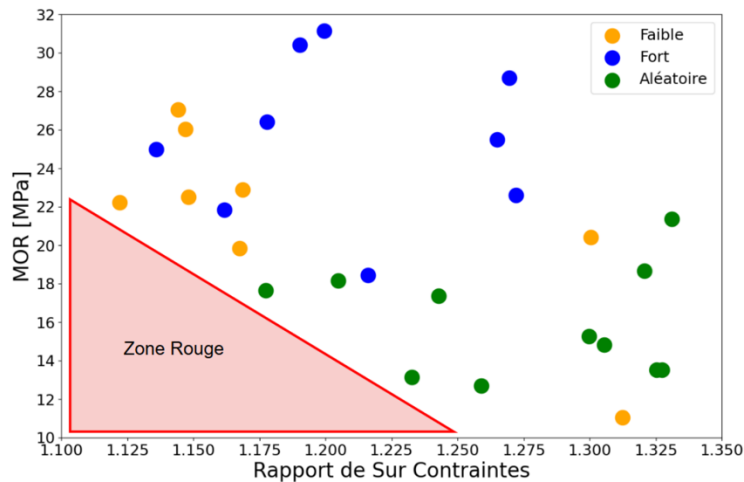


Fig. 7 : Relation entre le MOR et le Rapport de Sur-Contrainte (RSC) des LAP

## Conclusion

Cette étude montre l'impact crucial de l'hétérogénéité des MOE des courçons de bois feuillus utilisés pour la fabrication de LAP sur leurs performances mécaniques. Les résultats soulignent l'importance de la sélection des courçons constituant les lamelles en fonction de leurs propriétés mécaniques. L'hétérogénéité interne, représentée ici par les variations de MOE, influence directement la fiabilité et la performance des LAP. Un indicateur, le Rapport de Sur-Contraintes (RSC) a été proposé pour estimer la résistance des LAP, surpassant le MOE global vibratoire traditionnellement utilisé.

D'un point de vue technologique, il apparaît qu'une homogénéisation des courçons selon leur MOE grâce à un tri réalisé par machine vibratoire longitudinale permettrait d'atteindre des résistances bien supérieures pour une même ressource. Le tri proposé ici permet d'atteindre une classe T18 pour les LAP constituées de courçons de MOE fort. Pour les LAP constituées de courçons de modules faibles, le MoE moyen deviendrait le facteur limitant malgré une bonne résistance et ne permettrait d'obtenir qu'une classe T11 malgré une résistance caractéristique très importante.

Etant donné le faible nombre de lamelles testées, ces chiffres demandent validation, mais la tendance est très claire : la maîtrise de l'hétérogénéité de MoE des LAP est primordiale pour optimiser leur résistance, et donc très certainement également celle des produits en lamellé-collé les utilisant.

### **Remerciements**

Ce projet est soutenu financièrement par l'ADEME au travers des projet de recherche TreCEffiQuaS, et CHOC.

### **Références**

Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques, FCBA (2019) Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. ADEME, France Bois Forêt, CODIFAB.

EN 14080 (2013). Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements.

Kretschmann D. (2010) Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA.

Paradis S, Brancheriau L, Bailleres H (2017) Bing: Beam Identification by Non destructive Grading.

Soh Mbou D, Pot G, Viguiet J, Besseau B, Milhe L, Rolle J (2023) Modélisation de l'hétérogénéité des contraintes dans les lamelles aboutées panneautées de chêne. In: Actes des 12e journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois. HAL, Limoges, France.

Soh Mbou D, Besseau B, Pot G, Viguiet J, Marcon B, Milhe L, Lanvin J-D, Reuling D (2024) Oak timber cross-cutting based on fiber orientation scanning and mechanical modelling to ensure finger-joints strength. In: 11th Hardwood Conference. Sopron, Hungary.

## Comparaison des processus de fissuration des bois tropicaux pour la mobilité

HOUNGBEGNON Riccardo<sup>1,2</sup>, JAILIN Thomas<sup>1</sup>, DOKO Valery<sup>2</sup>, BLAYSAT Benoît<sup>1</sup>, SAUVAT Nicolas<sup>1</sup>, GRIL Joseph<sup>1</sup>, RECHO Naman<sup>1</sup>, XAVIER José<sup>3</sup>, DUBOIS Frédéric<sup>4</sup>, MOUTOU PITTI Rostand<sup>1,5</sup>

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

<sup>2</sup>Université d'Abomey-Calavi, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin

<sup>3</sup>University of Lisboa, Lisbon, Portugal

<sup>4</sup>Université de Limoges, GC2D, 19300, Égletons, France

<sup>5</sup>CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon

[Mahugnon.Riccardo.HOUNGBEGNON@etu.uca.fr](mailto:Mahugnon.Riccardo.HOUNGBEGNON@etu.uca.fr)

**Mots clefs :** *Khaya Ivorensis* ; *Magnolia Obovata* ; Méthode de la complaisance ; Analyse Spectrale Localisée ; Mobilité ; Fissuration.

### Contexte et objectifs

Il y a quelques années encore, les satellites étaient conçus en utilisant des matériaux comme l'aluminium, le titane, l'acier et les alliages. Mais après leur détérioration quelques décennies plus tard, leurs composants devenaient des débris spatiaux susceptibles de causer des dommages aux stations spatiales encore en activité. Des réflexions ont alors été menées dans le sens de l'utilisation du bois comme matériau de mobilité, de par sa légèreté, sa résistance et sa faculté à se consumer à son entrée dans l'atmosphère (Castané et al 2022). Cela a conduit à la conception du premier satellite en bois de *Magnolia Obovata*, essence Japonaise possédant de bonnes propriétés. Ce travail a pour objectif d'étudier de nouvelles essences pouvant se substituer au *Magnolia Obovata*, en prévision d'une utilisation croissante du bois comme matériau pertinent pour les véhicules. Nous avons donc comparé les processus de fissuration du *Khaya Ivorensis*, essence tropicale africaine peu connue, à ceux du *Magnolia Obovata* en vue d'évaluer leur durabilité face à des charges pouvant s'appliquer aux véhicules mobiles par exemple. Nous nous sommes donc concentrés sur des essais de fissuration en utilisant une méthode nouvelle, efficace dans la détermination des champs de déformations et de déplacements, afin d'évaluer au mieux les caractéristiques de fissuration de ces deux essences.

### Matériaux et méthodes

#### *Essences étudiées*

Deux essences de bois ont été utilisées pour effectuer les essais de fissuration. Il s'agit de *Magnolia obovata* et de *Khaya Ivorensis*. *Magnolia obovata* utilisé provient du Japon où il a été conservé sous atmosphère tempérée humide. *Khaya ivorensis*, quant à lui, provient du Bénin où le bois d'Acajou d'Afrique a été coupé et séché par voie naturelle sous atmosphère tropicale pendant une période d'un (1) mois. *Khaya ivorensis* a été choisi sur la base des données du CIRAD (1998), notamment sa densité, ses résistances en compression et flexion relativement proches de celles du *Magnolia obovata*, sa dureté, sa stabilité dimensionnelle, mais également sa disponibilité. Notons qu'après acquisition du *Khaya ivorensis*, une différence de densité a été constatée par rapport aux données du CIRAD (500 à 680 kg/m<sup>3</sup> pour le CIRAD et 800 kg/m<sup>3</sup>

pour notre étude). Les planches ont ensuite été découpées en scierie. Quelques propriétés mécaniques des deux essences sont présentées dans le Tab. 1.

Pour réaliser nos essais, nous avons utilisé des éprouvettes de type MMCG (Mixte Mode Crack Growth) modifiées (Fig. 1). L'éprouvette MMCG a été développée par Moutou Pitti (2008), en faisant un harmonieux compromis entre les éprouvettes DCB (Double Cantilever Beam) à inertie variable et CTS (Compact Tension Shear). L'avantage de l'éprouvette MMCG est que la fissure se propage de manière stable après son apparition, contrairement à l'éprouvette CTS. Nos éprouvettes, d'une épaisseur de 12 mm ont été découpées au Laser.

Tab. 1 : Propriétés mécaniques du *Khaya Ivorensis* et du *Magnolia Obovata*

Essences	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dureté	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Contrainte de rupture en flexion statique (MPa)	Contrainte de rupture en compression parallèle (MPa)	Retrait volumique total (%)
<i>Magnolia obovata</i>	550	1,1	7 500 à 10 300	59 à 82	31 à 43	10 à 13
<i>Khaya ivorensis</i>	800	2,4	9 500	85	46	12 à 13

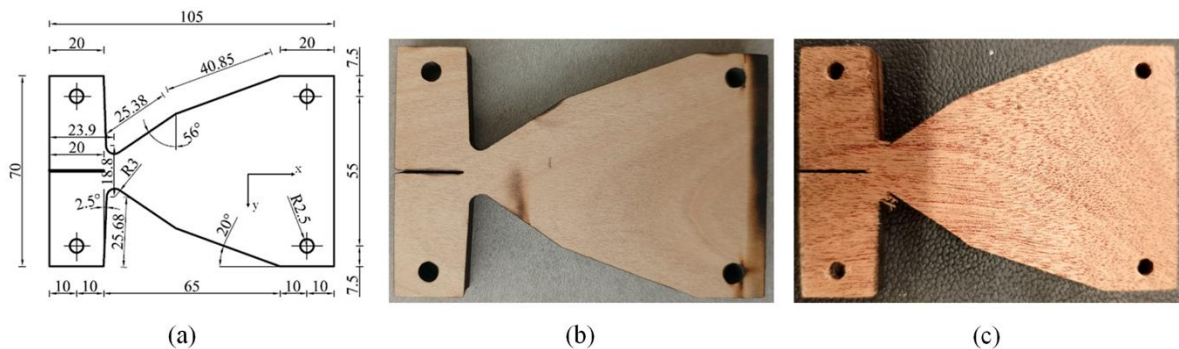


Fig. 1 : Eprouvette MMCG modifiée :(a) géométrie ; (b) *Magnolia Obovata* ; (c) *Khaya ivorensis*

### Méthode LSA et Essai de fissuration

L'analyse spectrale localisée est une technique développée pour extraire les champs de déplacement à partir d'images de motifs périodiques tels que les grilles 2D et les damiers, en minimisant le résidu optique dans le domaine de Fourier (Blaysat et al 2024). Pour réaliser les essais, un système Arcan en acier a été utilisé (Odounga 2018). Sa forme révèle un espace au milieu afin que le motif en damier gravé sur les spécimens soit visible et adapté à tous les modes de sollicitation, y compris le mode mixte avec ses différents angles de sollicitation (voir Fig. 2a). Une machine de traction-compression Zwick/Roel d'une capacité de 200 kN, représentée sur la Fig. 2b, a été utilisée pour réaliser les essais. Deux caméras (une de chaque côté du système) montées sur des trépieds ont permis de photographier le damier pendant les essais.

### Résultats

L'utilisation de deux caméras au cours des essais nous a permis de voir l'évolution de la fissure sur les deux faces de l'éprouvette. Nous notons des valeurs d'allongement de fissures légèrement plus élevées au niveau de la CAM1, d'une part en raison de la différence de résolution entre les deux caméras et d'autre part, en raison de la distance séparant chacune d'elle de l'éprouvette (70 cm pour la CAM1 et 20 cm pour la CAM2). La différence reste tout de même relativement faible (exemple de l'éprouvette K1P23 au tableau 2) avec une moyenne de 5 %.

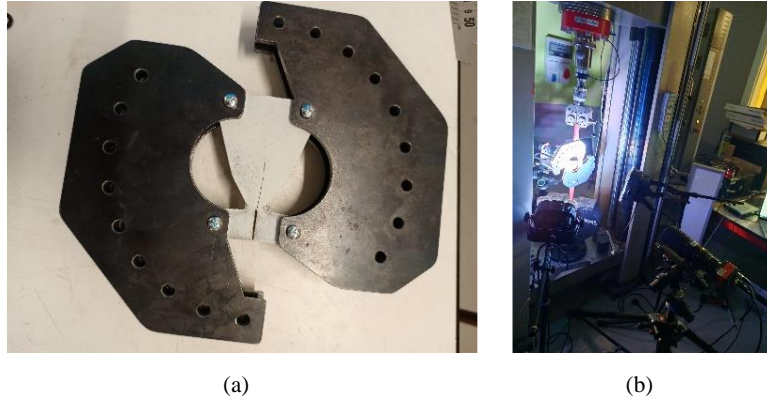


Fig. 2 : (a) Système Arcan ; (b) Dispositif expérimental

Tab. 2 : Comparaison des valeurs de  $\Delta a$  données par les CAM 1 et 2 pour l'éprouvette K1P23

Eprouvettes	Temps (s)	$F_c$ (N)	$\Delta a$ (mm)		Différence (%)	Moyenne (%)
			CAM 1	CAM 2		
K1P23	522	291	28,39	27,75	2	5
	557	320	31,41	28,41	11	
	625	366	32,82	31,67	4	
	968	535	51,06	49,29	4	
	1107	550	63,18	60,90	4	

Le calcul du taux de restitution d'énergie a été effectué par la méthode la complaisance en déplacement imposé, donné par la formule de Griffith :

$$G = \frac{F^2}{2b} \left( \frac{\Delta C}{\Delta a} \right)_d$$

avec  $F$  la force ayant causé une avancée de la fissure,  $\Delta C$  la complaisance,  $\Delta a$  l'incrément de fissure, et  $b$  l'épaisseur de l'éprouvette.

Ainsi, en mode d'ouverture de fissure, nous obtenons les courbes du taux de restitution d'énergie en fonction de l'avancée de fissure pour les essences de *Khaya ivorensis* et de *Magnolia obovata* (Fig. 3).

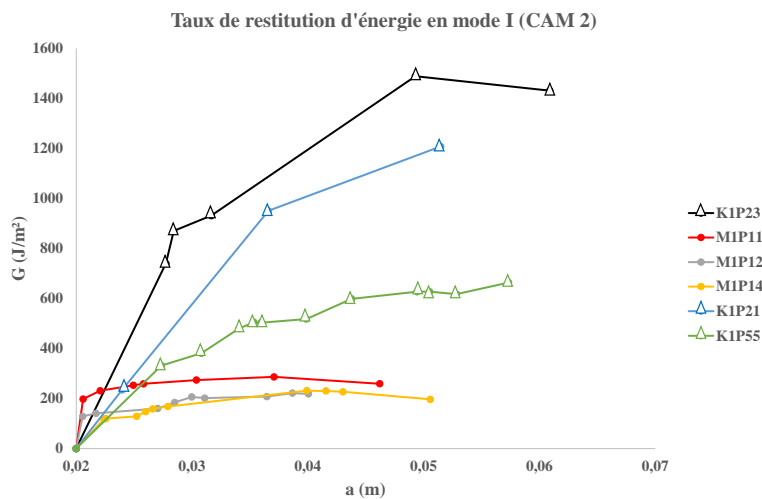


Fig. 3 : Taux de restitution d'énergie en fonction de l'avancée de fissure

La densité ainsi que l'humidité des éprouvettes testées a été mesurée lors des essais. Elles sont reportées dans le tableau ci-après :

Tab. 3 : Densité et humidité des éprouvettes testées

Eprouvettes	M1P11	M1P12	M1P14	K1P21	K1P23	K1P55
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	555	545	550	790	790	785
Humidité (%)	12	12	12	13	13	13

### Conclusion

Les essais de fissuration réalisés sur les essences de *Khaya ivorensis* et de *Magnolia obovata* montrent de belles performances en résistance à la fissuration, surtout pour le *Khaya ivorensis*, et cohérentes avec les densités. L'utilisation de *Khaya ivorensis* comme matériau de mobilité serait une grande valorisation de cette essence peu connue et contribuerait à la diffusion de la culture des bois tropicaux dans le monde entier. Le calcul des paramètres de fissuration avec prise en compte de la variation d'humidité et de température, ainsi que l'évaluation de l'impact du vieillissement et du stress répété sur la durabilité de *Khaya ivorensis*, constituent des perspectives à ce travail.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le programme CIT ITPS Cap2025 (UCA) et l'ANR via les projets WoodMob, Emergence et DIAMWOOD pour le soutien apporté à ce travail.

### Références

- Blaysat B, Sur F, Jailin T, Vinel A, Grédiac M (2024) Open LSA : une boîte à outils à code source ouvert pour le calcul des déplacements plein champ à partir d'images de motifs périodiques, *SoftwareX*, 1-17, doi : 10.2139/ssrn.4784553.
- Castané B, Bouvet C, Serra J, Eyma F, Cantarel A (2022) Le bois, un matériau pour la mobilité durable ?, 2<sup>ème</sup> Conférence sur les Eco-Matériaux en Afrique, 1-4.
- Moutou Pitti R (2008) Découplage de la rupture en mode mixte dans les matériaux viscoélastiques orthotropes : Modélisation et expérimentation, thèse de l'Université de Limoges, 162 p.
- Odounga B (2018) Étude de la fissuration des bois tropicaux par mesures des champs, thèse de l'Université Clermont Auvergne, 207 p.
- Gérard J, Edi Kouassi A, Daigremont C, Détienne P, Fouquet D, Vernay M (1998) Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains, CIRAD-Forêt, 18-21.

## Quantification de la capacité de dissipation d'énergie des arbres après un feu de forêt : cas du massif de Bitsch (CH)

NOYER Estelle<sup>1</sup>, MONOD Ella<sup>1</sup>, DLOUHA Jana<sup>2</sup>, KRAMER Lukas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Haute Ecole Spécialisée Bernoise, HAFL, Zollikofen, Suisse

<sup>2</sup> Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France

<sup>3</sup> Haute Ecole Spécialisée Bernoise, AHB, Bienne, Suisse

[estelle.noyer@bfh.ch](mailto:estelle.noyer@bfh.ch)

**Mots clés :** feu, densité du bois, aubier, dissipation d'énergie, chute de pierre, forêt

### Contexte et objectifs

Depuis quelques décennies, l'augmentation des feux de forêts de forte intensité difficilement contrôlables (Bowman et al 2009) et le risque grandissant pour les zones originellement peu prônes aux incendies (Grünig et al 2023) préoccupent les gestionnaires forestiers du fait des altérations engendrées sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes forestiers. Outre la forte mortalité des arbres, laissant un nombre de tiges brûlées sur pied conséquent, les dommages structuraux induits par le feu peuvent varier d'une réduction du volume du houppier à la destruction partielle du système racinaire plus ou moins superficiel réduisant la stabilité des individus, en passant par une carbonisation du bois des tiges sur pied. Les arbres survivants peuvent ne pas récupérer de ces dommages, menant à une mortalité différée dans le temps (Hood et al 2018, Busby et al 2024). A une plus fine échelle, les propriétés mécaniques des tiges à la suite d'un feu de forêt sont peu reportées (Rust 2015, Lukina et al 2022). Néanmoins, les impacts d'un traitement thermique sur les propriétés du bois sont mieux connus. Accompagné d'une perte de masse, le bois traité montrera une meilleure dureté matérielle et durabilité dans le temps mais aussi une plus grande vulnérabilité à l'impact et une réduction du module de rupture (Murata et al 2013, Candelier et al 2016), démontrant une altération potentielle des propriétés mécaniques de la tige.

Dans le cas des forêts de protection, une perturbation extrême se traduit par une perte de la capacité de protection de la forêt contre les dangers naturels (May et al 2023). Pour quantifier les impacts sur la fonction de protection contre les chutes de pierre, les modèles actuels (Volkwein et al 2011) décrivent l'effet protecteur d'une forêt contre les chutes de pierre en fonction de la densité des tiges (*i.e.* probabilité d'impact) ainsi que de la capacité des arbres à dissiper l'énergie lors d'un impact avec un block ( $E_{diss, cap}$ ). Toutefois, ces modèles ont été calibrés sur des arbres sains, sous-entendant des propriétés du bois homogènes dans les scénarios testés.

Ce projet vise donc à estimer la capacité maximale de dissipation d'énergie des arbres brûlés afin d'évaluer l'effet protecteur d'une forêt après un feu de forêt. Une première partie se concentre sur l'estimation de l'effet protecteur du site de Bitsch dont le massif forestier a subi en juillet 2023 un feu de forêt intense et non contrôlable. De premières hypothèses sur les caractéristiques des arbres 1, 5 et 10 ans après le feu de forêt sont testés pour estimer l'effet protecteur. Une deuxième partie se focalise sur le développement d'une méthode en laboratoire pour la mesure des propriétés mécaniques pertinentes des tiges dans l'estimation de la capacité maximale de dissipation d'énergie permettant ainsi de valider les hypothèses développées en première partie. L'objectif final est de pouvoir répliquer *in vivo* les dommages causés par un



incendie sur les arbres survivants et de proposer aux praticiens une évaluation rapide de l'effet protecteur des peuplements touchés.

## Matériel et méthodes

### *Site d'étude*

Le site d'étude se situe proche de la ville de Bitsch dans le canton du Valais en Suisse (46.35, 8.01, altitude 1522 m). La localisation du site est en région montagneuse où la typologie présente des pentes moyennes de 35.95°. Le site est principalement composé de *Picea abies* (> 80 %) et dans de moindres proportions de *Pinus sylvestris*, *Pinus cembra* et *Larix decidua*.

Un feu de forêt a eu lieu du 17 juillet au 3 août 2023 (*i.e.* 19 jours) sous des conditions très venteuses, générant une expansion *via* le sol (30 à 40 cm de profondeur) ainsi que par les cimes. Les surfaces des zones brûlées, allant de 0.3 à 2 076 m<sup>2</sup>, présentent une médiane de 28 m<sup>2</sup> et une moyenne de 118 m<sup>2</sup>. Au total, 110 hectares ont brûlé sur l'ensemble du massif forestier.

### *Effet protecteur du massif forestier de Bitsch contre les chutes de pierre*

Pour chaque arbre du site d'étude dont le diamètre à 1.30 m est supérieur à 12 cm, le diamètre, la hauteur totale, la largeur de la couronne et la vitalité sont mesurés en juillet 2024 à partir d'un nuage de points réalisé avec un drone (M300RTK, DJI) équipé par une caméra multispectrale (MicaSense Altum). L'analyse du nuage de points avec le package lidR v. 4.1.2 (Roussel et al 2020) a permis d'extraire les caractéristiques architecturales des arbres. La vitalité des arbres a pu être apprécié *via* le calcul de deux indices de végétation à partir des données multispectrales : le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le NPCRI (Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index). Une classification a permis par la suite la définition de zones forestières homogènes.

En complément, de premiers profils radiaux de la densité basique du bois et de la profondeur du bois conducteur ont été acquis sur un sous-échantillonnage de dix arbres (DBH = 18 ± 4 cm, six arbres brûlés et quatre arbres non brûlés) prélevés au mois d'août 2024.

L'estimation de la capacité maximale de dissipation d'énergie des tiges ( $E_{diss, cap}$ , kJ) a été ajustée de Dorren et al (2006) de manière à prendre en compte la perte en masse du bois brûlé dans le temps et la réduction de la surface conductrice du bois. L'effet protecteur du site d'étude est estimé par le modèle RockFor3D (Dorren 2016). Une première simulation sans forêt est utilisée comme référence. Plusieurs simulations sont ensuite réalisées en modifiant les caractéristiques individuelles des arbres pour évaluer l'impact du feu de forêt sur la probabilité de chutes de pierre.

### *Quantification des propriétés mécaniques des tiges en laboratoire*

Les essais en laboratoire visent à quantifier la perte potentielle en  $E_{diss, cap}$  des tiges brûlées et d'identifier les modifications à inclure au modèle existant. La capacité maximale de dissipation d'énergie définie par les modèles de chutes de pierre est basée sur des mécanismes de rupture multiples.

Dans ce contexte, des essais de flexion statique monotone à trois points sont prévus sur 30 grumes de *Picea abies* de 18 ± 4 cm de diamètre et 3 m de long, réparties en deux groupes (témoins et brûlées). Cette configuration permet d'évaluer la résultante de la déformation et de la rupture (*i.e.* flexion, cisaillement et compression perpendiculaire au grain). Les grumes fraîches seront traitées avant le début du processus de séchage pour se rapprocher des conditions *in situ*. Enfin, la combustion des grumes brûlées sera réalisée en chambre contrôlée et sur un seul côté de la tige pour imiter au mieux les dommages observés sur le site de Bitsch.

## Résultats préliminaires

Le carottage d'un sous-échantillonnage d'arbres a montré que les arbres non brûlés conduisent de la sève sur *cca.* 55 % de leur rayon, tandis que les arbres brûlés sévèrement ne présentent plus de surface conductrice. La densité basique du bois est aussi significativement affectée un an après le feu de forêt (médiane : 562.8 vs. 481.4 kg.m<sup>-3</sup> chez les arbres non brûlés et brûlés, respectivement). Cette réduction de la densité du bois et la perte de la surface conductrice réduit en moyenne  $E_{diss,cap}$  des arbres brûlés de 46 % (42.25 – 47.47 % pour l'ensemble des arbres).

L'inventaire réalisé à partir du nuage de points a pu identifier 808 arbres tandis que la classification a permis de définir 28 zones homogènes avec lesquelles les premières simulations ont été faites avec RockyFor3D. Les résultats en Fig. 1 montrent la probabilité de passage de block dans la zone d'étude. La comparaison entre la simulation de référence (sans forêt, Fig. 1 gauche) et avec une forêt saine (Fig. 1 droite) indique que l'effet protecteur s'illustre par une diminution de la longueur des couloirs de transit, limitant la probabilité de chutes de pierre sur les villages environnants. Les simulations avec les nouvelles valeurs de  $E_{diss,cap}$  sont en cours de traitement.

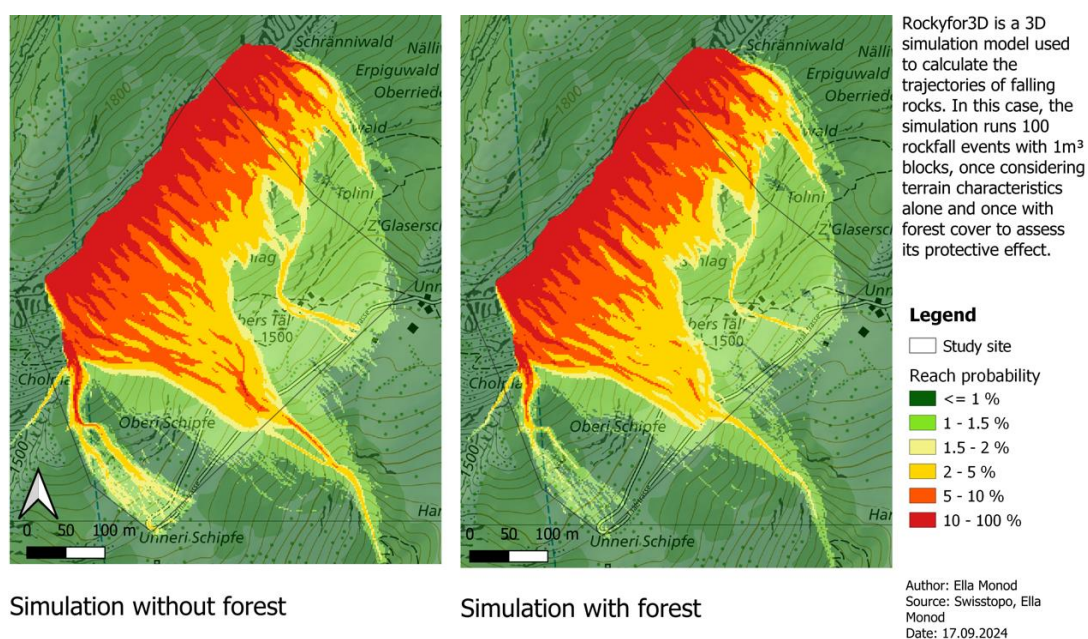


Fig. 1 : Cartes de probabilité des trajectoires des chutes de pierre sur le site de Bitsch.

## Conclusions et perspectives

Cette analyse préliminaire montre que l'altération des propriétés matérielles du bois des tiges brûlées diminue considérablement  $E_{diss,cap}$  des arbres sur l'ensemble du peuplement. Ces premiers résultats permettent de mettre en avant la nécessité de prendre en compte les propriétés matérielles, aussi triviales soient-elles, dans l'estimation des paramètres contribuant à l'effet protecteur contre les chutes de pierre. Les simulations avec les valeurs de  $E_{diss,cap}$  ajustées pourront quantifier la diminution potentielle de l'effet protecteur d'une forêt brûlée. Toutefois, basée sur des hypothèses théoriques, l'approche utilisée pour ajuster  $E_{diss,cap}$  a besoin d'être comparé aux essais réalisés en laboratoire sur des tiges saines et brûlées artificiellement en conditions contrôlées. Une fois l'approche validée et ajustée, des hypothèses sur la perte en masse des arbres survivants et brûlés seront explorées afin de simuler l'état futur de la forêt de protection du massif de Bitsch.

## Remerciements

Ce projet est supporté par le programme Junior Scholars : BFH transversal de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise BFH.

## Références

Bowman DMJS, Balch JK, Artaxo P, et al (2009) Fire in the earth system. *Science* 324:481–484.

Busby S, Evers C, Holz A (2024) Patterns, drivers, and implications of postfire delayed tree mortality in temperate conifer forests of the western UNITED STATES. *Ecosphere* 15(4):e4805.

Candelier K, Thevenon M-F, Petrissans A, et al (2016) Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science* 73:571–583.

Dorren L (2016) A Rockyfor3D (v5. 2) revealed—Transparent description of the complete 3D rockfall model.

Dorren LKA, Berger F, Putters US (2006) Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:145–153.

Grünig M, Seidl R, Senf C (2023) Increasing aridity causes larger and more severe forest fires across Europe. *Global Change Biology* 29:1648–1659.

Hood SM, Varner JM, Van Mantgem P, Cansler CA (2018) Fire and tree death: Understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters* 13.

Lukina A, Lisyatnikov M, Martinov V, et al (2022) Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood. *AEJ* 7:44–52.

May D, Moos C, Dorren L, et al (2023) Quantifying the long-term recovery of the protective effect of forests against rockfall after stand-replacing disturbances. *Frontiers in Forests and Global Change* 6.

Murata K, Watanabe Y, Nakano T (2013) Effect of Thermal Treatment on Fracture Properties and Adsorption Properties of Spruce Wood. *Materials* 6:4186–4197.

Roussel J-R, Auty D, Tompalski NCC and P, et al (2020) lidR: An R package for analysis of airborne laser scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment* 251:112061.

Rust SM (2015) Classification of timber from *Pinus radiata* trees exposed to forest fires. PhD, Stellenbosch: Stellenbosch University, 71 p.

Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, et al (2011) Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:2617–2651.

## Conception et caractérisations d'un isolant innovant à base de coproduits d'usinage et de champignon : le myco-composite

FIGEL Laura<sup>1</sup>, AYADI Melek<sup>1</sup>, AGUILAR Kyle<sup>1</sup>, SAKER Safwan<sup>2</sup>, ROSE Christophe<sup>3</sup>, PERRIN Christelle<sup>1</sup>, ANTOINE Marie-Laure<sup>1</sup>, LALLEMAND Julien<sup>1</sup>, REMOND Romain<sup>1</sup>, MOUGEL Eric<sup>1</sup>, LE COZ Gaël<sup>4</sup>, HASSAN Alaa<sup>5</sup>, BOUDAUD Hakim<sup>5</sup>, VAHABI Henri<sup>6</sup>, FRECHARD Victor<sup>7</sup>, MEYER Julien<sup>7</sup>, BESANCON Franck<sup>7</sup>, BROSSE Nicolas<sup>1</sup>, BESSERER Arnaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LERMAB, Université de Lorraine, USC INRAE 1445, Epinal

<sup>2</sup>CRITT Bois, Epinal

<sup>3</sup>INRAe, Centre Grand-Est, Champenoux

<sup>3</sup>LEM3, Université de Lorraine, UMR CNRS 7239, Metz

<sup>4</sup>ERPI, Université de Lorraine, Nancy

<sup>5</sup>LMOPS, Université de Lorraine, CentraleSupélec, Saint-Avold

<sup>6</sup>MAP-Crai, Université de Lorraine, UMR CNRS 3495, Nancy

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

**Mots clés :** Myco-composite ; coproduits d'usinage ; hêtre ; *Trametes versicolor* ; isolant

### Introduction

Dans un contexte où la durabilité et l'innovation sont essentielles, notre recherche se concentre sur le développement d'un isolant novateur : le myco-composite. Ce matériau est conçu à partir de biomasse et de champignons, offrant ainsi une solution écologique et performante pour l'isolation (Alaneme et al 2023). Actuellement, les polymères synthétiques tels que le polyuréthane et le polystyrène ont été largement utilisés comme matériaux d'isolation thermique en raison de leur faible conductivité thermique et de leur capacité thermique massique élevée. Cependant, ces matériaux présentent des inconvénients majeurs en termes de durabilité environnementale. Leur recyclage est coûteux en énergie, leur non-biodégradabilité pose des problèmes de gestion en fin de vie, et leur production ainsi que leur élimination sont associées à des risques environnementaux significatifs (Alemu et al 2022). Ces enjeux persistent et soulignent la nécessité de développer des alternatives plus écologiques et durables dans le domaine de l'isolation thermique. La conception de notre nouvel isolant, le myco-composite, repose sur une approche intégrée qui vise à valoriser les ressources lignocellulosiques tout en exploitant les propriétés uniques des champignons : le mycélium agit alors comme une colle naturelle pour le bois.

Notre étude a porté sur deux types de myco-composites : i) des myco-composites à base de hêtre massif sous forme de particules et ii) des myco-composites à base de coproduits d'usinage de hêtre. *Trametes versicolor*, un champignon présent localement, a été choisi pour cette étude. Des caractérisations de l'échelle macroscopique à microscopique ont permis d'évaluer les performances thermiques et mécaniques de ces myco-composites et de les comparer.

Notre étude vise à contribuer à l'avancement des connaissances sur les matériaux biosourcés et ouvre la voie à des applications innovantes dans le domaine de l'isolation. En alliant écologie et efficacité, le myco-composite représente une réponse prometteuse aux défis contemporains liés à la construction durable et à la gestion des ressources.

## Matériels et méthodes

### Matériels biologiques

Le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) a été récolté dans le massif des Vosges (France). Le bois a été préalablement débité en éléments de petite taille avant d'être broyé en particules à l'aide d'un broyeur, équipé de tamis de 8 mm (Cross beater mill SK100, Retsch, Allemagne). Les coproduits d'usinage ont été obtenus à l'aide d'une fraise hélicoïdale de 25 mm de diamètre sur du hêtre massif.

### Préparation du milieu et culture fongique

Tous les milieux ont été stérilisés à 121°C pendant 20 minutes avant inoculation (autoclave Vapour Line 135-M, VWR, Allemagne). Pour obtenir un tapis fongique, une culture initiale de *T. versicolor* CTB 863 A a été cultivée sur milieu malt-agar contenant 20 g.L<sup>-1</sup> d'extrait de malt pendant 7 jours. Cinq plugs (diamètre 8 mm) provenant des boîtes de Petri de *T. versicolor* ont été inoculés dans des erlenmeyers bafflés de 250 mL contenant 50 mL de milieu malt (20 g.L<sup>-1</sup>). Les erlenmeyers inoculés ont été placés dans un incubateur agitateur (Innova 44, New Brunswick Scientific, Allemagne) pendant 2 jours à 28°C et 100 rpm. Après 2 jours, la culture a été utilisée pour inoculer un bioréacteur stérile de 7 L rempli de milieu malt à 20 g.L<sup>-1</sup> pour un volume final de 5 L (Global Process Concept, PRO-LAB, France). Les conditions de culture ont été maintenues à 28°C, 80% O<sub>2</sub>, 250 rpm et pH 5. Des sondes ont été utilisées pour surveiller les paramètres de croissance (pH, température, potentiel redox, oxygène et densité optique des pellets). La culture a été récupérée après 72h de croissance. Le mélange de milieu et de champignon a été séparé par centrifugation à 4200 rpm pendant 10 min à température ambiante (Multifuge X4R Pro, Thermo Scientific, USA). Le champignon a été utilisé pour produire la nurserie myco-composite.

### Production du myco-composite

Le substrat était constitué soit de particules de hêtre natives, soit de coproduits d'usinage de hêtre. Les deux types de particules ont été stérilisés avec de l'eau à 121°C pendant 20 min, atteignant une humidité à saturation des fibres de 60% pour le bois natif et 70% pour les coproduits. Un rapport poids/volume de 1: 2 de champignon a été mélangé au substrat dans une boîte avec filtre (Greiner bio-one, France) pour créer une culture appelée nurserie. Celle-ci a été incubée à 28°C et 60% d'humidité relative pendant 14 jours. Les myco-composites ont ensuite été produits en mélangeant ¼ de nurserie avec ¾ de biomasse préalablement préparée et stérilisée aux mêmes taux d'humidité que précédemment. Ces myco-composites ont été laissés en incubation pendant 1 mois à 28°C et 65% d'humidité relative, puis démoulés et séchés dans une étuve à 65°C pendant une nuit. L'ensemble du processus de production est illustré dans la Fig. 1.

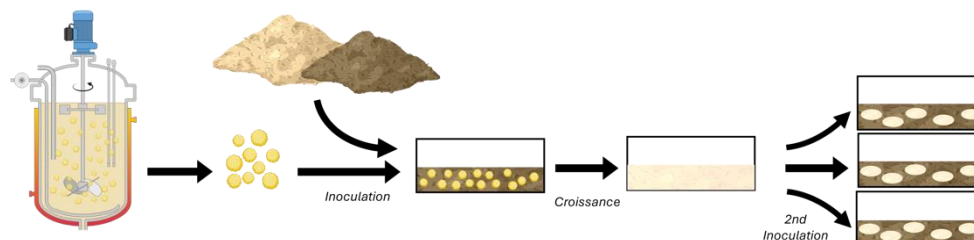


Fig. 1 : Schéma de production de myco-composites.

### Caractérisations

### Caractérisations morphologiques macroscopiques

Tous les échantillons ont été analysés par des inspections visuels. La masse volumique a été déterminée à partir de la masse après séchage et du volume de l'échantillon. Les mesures de masse ont été effectuées à l'aide d'une balance de précision, tandis que le volume a été déterminé par des mesures dimensionnelles. Chaque mesure a été répétée 10 fois pour assurer la reproductibilité des résultats.

### Caractérisations morphologiques microscopiques

Le microscope électronique à balayage (MEB) Jeol IT200 a été utilisé pour analyser les échantillons à l'échelle microscopique. Les échantillons ont été métallisés avec un alliage or/palladium d'une épaisseur de 4,8 Å à l'aide d'un métalliseur ACE600 (LEICA, Allemagne). Les observations ont été réalisées en mode haut vide avec un détecteur d'électrons secondaires (SE). La distance de travail était de 10 mm. La tension d'accélération et le courant de sonde ont été fixés respectivement à 10 kV et 60 %.

### Caractérisations thermiques

La conductivité thermique des échantillons de myco-composite a été évaluée avec un appareil à fluxmètre, conformément à la norme NF EN 12667. Les échantillons ont été préparés sous forme de panneaux carrés de 150 mm de côté, avec une épaisseur de 30 mm. Avant les mesures, les échantillons ont été séchés pendant 72 heures à 70 °C jusqu'à masse constante puis conservés dans un dessiccateur jusqu'à l'analyse. La surface des échantillons a été moulée directement dans une forme appropriée. L'appareil à fluxmètre est un dispositif qui mesure la densité du flux thermique à travers une éprouvette par une différence de température générée par cette densité de flux thermique traversant l'éprouvette et le fluxmètre lui-même. L'échantillon étant placé dans l'enceinte, un gradient de température est établi entre les plaques chaude et froide maintenues respectivement à 20°C et 0°C, établissant ainsi un flux thermique de densité unidirectionnelle, constante et uniforme. Un moule en polyuréthane de dimensions 300 mm x 300 mm a été utilisé pour positionner précisément l'échantillon de 150 mm x 150 mm (Fig. 2). Avant chaque mesure, le système de refroidissement a été activé et stabilisé. La durée typique d'une mesure était comprise entre 1,5 et 2 heures, permettant d'atteindre l'équilibre thermique et d'obtenir des valeurs de conductivité thermique fiables.

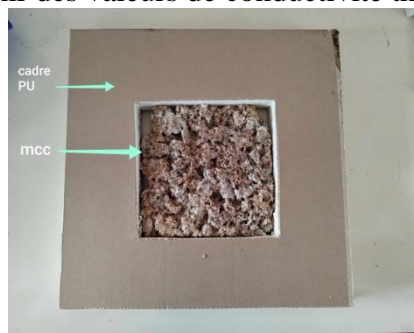


Fig. 2 : Montage utilisé pour les caractérisations thermiques

### Caractérisations mécaniques

Les échantillons de myco-composites ont été découpés en éprouvettes rectangulaires de dimensions 10 cm x 5 cm à l'aide d'une micro-scie à ruban Proxxon MBS 240/E. Les propriétés mécaniques des échantillons ont été évaluées par des essais de compression uniaxiale non confinée, à l'aide d'une machine d'essai universelle Zwick Roell Z050.

## **Résultats et discussion**

Les échantillons de myco-composites ont été soumis à une inspection visuelle approfondie (Fig. 3). L'observation a révélé une colonisation non uniforme du mycélium, tant pour les substrats

de hêtre brut que pour les coproduits d'usinage. La masse volumique des myco-composites varie selon le substrat utilisé :  $177 \pm 13 \text{ kg/m}^3$  pour ceux à base de coproduits et  $200 \pm 10 \text{ kg/m}^3$  pour ceux à base de hêtre brut. La surface des myco-composites à base de hêtre bruts semble plus colonisée que celle à base de coproduits.



Fig. 3 : Observation visuelle des myco-composites fabriqués à partir de a) particules de hêtre et b) de coproduits d'usinage hêtre.

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a mis en évidence des différences morphologiques significatives au niveau des hyphes fongiques (Fig. 4). Dans les myco-composites à base de coproduits d'usinage, les hyphes apparaissent plus denses et plus épais (diamètre moyen de  $1,21 \pm 0,24$ ,  $n=10$ , Fig. 4b) par rapport à ceux observés dans les myco-composites à base de hêtre brut (diamètre moyen de  $0,93 \pm 0,12 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n=10$ , Fig. 4a). Cette différence structurale pourrait influencer les propriétés mécaniques et thermiques du matériau final.

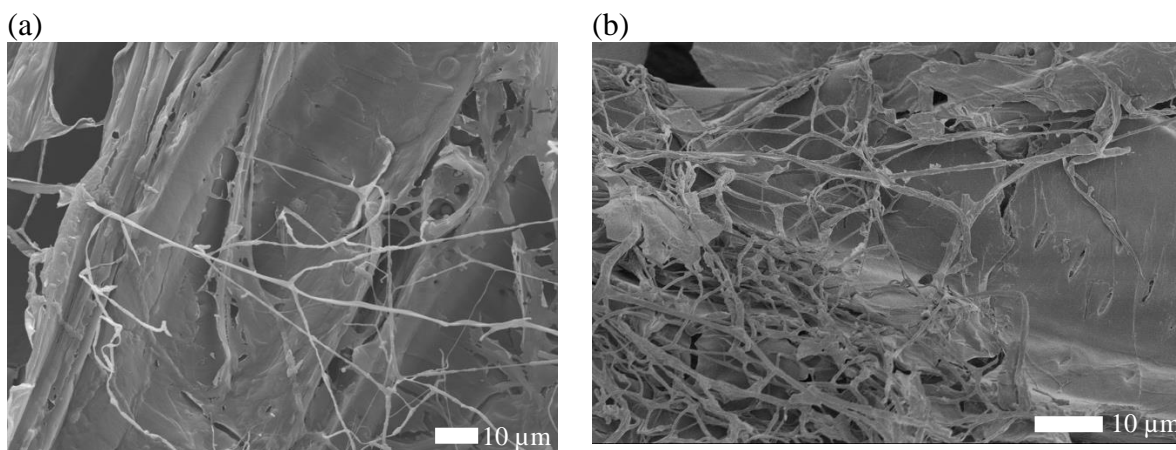


Fig. 4 : Observation au MEB des myco-composites:  
(a) à base de particules de hêtre ; (b) à base de coproduits d'usinage.

Des caractérisations thermiques ont été effectuées pour évaluer le potentiel d'utilisation de ces myco-composites comme matériaux isolants. Les essais ont révélé une conductivité thermique ( $\lambda$ ) de  $0,06451 \text{ W/m.K}$  pour les myco-composites à base de hêtre et de  $0,05673 \text{ W/m.K}$  pour ceux à base de coproduits d'usinage. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées dans la littérature pour d'autres matériaux biosourcés. Par exemple, Jones et al (2020) ont rapporté des valeurs de conductivité thermique allant de  $0,04$  à  $0,08 \text{ W/m.K}$ . La différence notable entre nos deux myco-composites peut s'expliquer par la porosité plus importante des myco-composites à base de coproduits, dont la granulométrie est inférieure à  $6 \text{ mm}$ , contribuant ainsi à réduire la composante de conduction thermique du transfert thermique résultant en une meilleure isolation thermique de ces derniers.

Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des essais de compression. La force de compression à 10% est presque deux fois plus importante pour les myco-composites à base de coproduits d'usinage (environ 0,090 MPa) que pour ceux formés à partir de particules de hêtre (environ 0,050 MPa) (Fig. 5). Elsacker et al (2019) ont observé des résistances à la compression allant de 0,04 à 0,35 MPa pour différents substrats lignocellulosiques. Nos résultats se situent dans cette gamme, avec une performance supérieure pour les myco-composites à base de coproduits d'usinage. Ces résultats suggèrent que la structure et la qualité de l'interaction entre les hyphes fongiques et le substrat sont plus déterminantes pour la résistance à la compression que la simple quantité de mycélium.

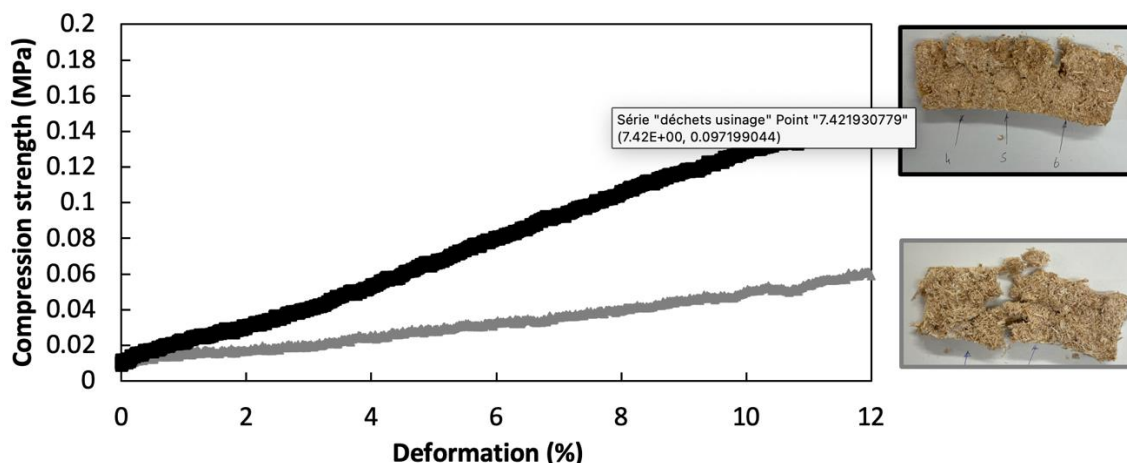


Fig. 5 : Force de compression en fonction de la déformation pour les myco-composites à base de particules de hêtre (gris) et de coproduits d'usinage (noir). Insert : photo des myco-composites après les essais de compression.

Les performances de nos myco-composites ont été comparées à deux isolants commerciaux : un panneau isolant biosourcé à base de fibre de bois et un panneau en polyuréthane (PU) (Tab. 1). Bien que les myco-composites présentent des capacités isolantes inférieures à ces matériaux conventionnels, ceux à base de coproduits d'usinage montrent des caractéristiques prometteuses, notamment en raison de la granulométrie fine des particules qui favorise une meilleure isolation thermique.

Tab. 1 : Récapitulatif des principales caractéristiques des myco-composites fabriqués dans cette étude, de l'isolant en fibre de bois et en polyuréthane.

	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> .K/W)*	Force de compression n (%)**	Réf
Myco-composite hêtre	200 ± 10	0.06451	(30)0,46	CS(10\Y)50 ± 10	Cette étude
Myco-composite coproduits hêtre	177 ± 13	0.05673	(30)0,53	CS(10\Y)92 ± 33	Cette étude
Fibre de bois	55 ± 5	0,036 à 0,046	(50) 1,35	NPD	Pavatex® (Soprema)
Polyuréthane	33 ± 3	0,022 à 0,025	(30) 1,30	CS(10\Y)17 5	Soprema

NPD signifie non défini.

\*(X) représente l'épaisseur du mycocomposite en mm.

\*\* CS(10\Y)X ± X : CS signifie *compression strength*, 10\Y signifie à 10 % de déformation.

L'utilisation de coproduits d'usinage dans nos myco-composites s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, en accord avec les tendances actuelles de la recherche. Comme le soulignent Attias et al (2020), l'utilisation de déchets lignocellulosiques comme substrat pour les myco-matériaux offre une solution durable pour la valorisation des résidus industriels.



## Conclusion

Les premiers essais révèlent une différence significative de comportement en fonction du type de biomasse utilisée. En particulier, les myco-composites à base de coproduits d'usinage semblent être plus adaptés à une application d'isolation, ce qui souligne l'importance de la granulométrie sur les propriétés isolantes du matériau final.

Il serait intéressant d'explorer la possibilité de varier la souche de champignon utilisée ou de réaliser des mélanges de biomasses, car cela pourrait permettre d'obtenir un isolant dont les propriétés se rapprochent de celles des fibres de bois.

En conclusion, nos myco-composites, en particulier ceux à base de coproduits d'usinage, présentent des propriétés comparables ou même supérieures à celles rapportées dans la littérature pour des matériaux similaires. Leur potentiel en tant qu'alternative durable aux isolants conventionnels est prometteur, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour optimiser leurs performances et explorer leur applicabilité à grande échelle. Ces études futures pourraient inclure l'optimisation des formulations, l'évaluation de la durabilité à long terme dans diverses conditions environnementales et l'analyse du cycle de vie complet pour quantifier les bénéfices environnementaux.

## Remerciements

Ce projet est financé par Lorraine Université d'Excellence (LUE) Mycobat.

## Références

Alemu D, Tafesse M, Mondal AK (2022) Mycelium-based composite: The future sustainable biomaterial. *International journal of biomaterials*, 2022(1), 8401528.

Attias N, Danai O, Abitbol T, Tarazi E, Ezov N, Pereman I, Grobman YJ (2020) Mycelium biocomposites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119037.

Elsacker E, Vandelook S, Brancart J, Peeters E, De Laet L (2019) Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One*, 14(7), e0213954.

Girometta C, Picco AM, Baiguera RM, Dondi D, Babbini S, Cartabia M, ... Savino E (2019) Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: a review. *Sustainability*, 11(1), 281.

Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanassiou A (2017) Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Scientific reports*, 7(1), 41292.

Jones M, Mautner A, Luenco S, Bismarck A, John S (2020) Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397.

## **Présentation du projet ForesTIA (improving FORESt and Timber engineering education in Madagascar through Industry-Academia partnerships)**

RANDRIAMBININTSOA Tiavina<sup>1,2</sup>, RAMANANANTOANDRO Tahiana<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Foresterie et Environnement, Antananarivo 101, Madagascar

<sup>2</sup>Unité de Formation Sciences du Bois, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Foresterie et Environnement, Antananarivo 101, Madagascar

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

**Mots clefs** : ateliers ; conférence internationale ; enseignement ; partenariat industries-académies ; ingénierie du bois ; stage en entreprise ; visites d'entreprises

### **Contexte et objectifs**

Madagascar est confronté à d'importants défis environnementaux et économiques liés à la gestion de ses ressources forestières. La déforestation, l'exploitation non durable des forêts et le manque d'innovation dans l'utilisation du bois constituent des enjeux critiques. De plus, l'enseignement de la foresterie et de l'ingénierie du bois dans le pays souffre d'un manque de collaboration avec l'industrie, limitant ainsi l'employabilité des étudiants et la capacité des chercheurs à proposer des solutions adaptées aux besoins locaux. C'est dans ce contexte qu'est né le projet ForesTIA, intitulé " improving FORESt and Timber engineering education in Madagascar through Industry-Academia partnerships". Soutenu et financé par Royal Academy of Engineering (Royaume-Uni), il s'inscrit dans le cadre du programme HEP SSA, qui vise à faire en sorte que le système d'enseignement supérieur en Afrique subsaharienne forme des ingénieurs compétents, capables de répondre aux besoins de l'industrie et de relever les défis à l'échelle locale et mondiale. L'objectif général du projet est d'améliorer l'enseignement de la foresterie et de l'ingénierie du bois à Madagascar en alignant les programmes académiques sur les besoins de l'industrie, tout en développant les compétences des enseignants et des étudiants pour une meilleure adéquation avec le marché professionnel.

### **Méthodologie**

Lors de sa réalisation, le projet a adopté un modèle « Hub – spoke » suggéré par les bailleurs. Les partenaires suivant le modèle « Hub-spoke » dans le projet sont :

- Lead university (Hub) : Mention Foresterie et Environnement de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo ;
- UK university: School of Engineering, University of Edinburgh;
- Spoke universities: Institut Supérieur de Technologie Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique Antsiranana, Centre National de Formation de Techniciens Forestiers Angavokely, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo ;
- Madagascar industry partners: Tropical Wood, Les Scieries du Betsileo, Hazovato, Laboratoire National des Travaux Publics, Idom'Art
- UK industry partner: Open Systems Lab

Pour assurer ce partenariat entre les industries et les académies, plusieurs activités ont été conçues et organisées, impliquant la participation des deux parties, telles que les organisations de :

- Visites en entreprises : où étudiants et enseignants découvrent les pratiques et technologies industrielles, visites généralement organisées dans les partenaires industriels du projet à Madagascar
- Construction de type WikiHouse : plusieurs séminaires ont été organisés en ligne avec les partenaires de UK pour apprendre et maîtriser les constructions de type WikiHouse (<https://www.wikihouse.cc>). Un chantier école est en cours de mise en œuvre.
- Stages pratiques des étudiants en entreprise : permettant aux étudiants d'acquérir des compétences concrètes et de s'immerger dans l'environnement industriel. Les étudiants s'enrichissent professionnellement.
- Détachement des enseignants en entreprise : permettant aux enseignants d'adapter leurs cours académiques et leurs recherches scientifiques en fonction de ce qu'ils ont reçus en entreprise ;
- Conférences académiques : animées par des professionnels du secteur, favorisant un échange direct entre les académies et les industries.
- Ateliers de partage de connaissances : qui portent sur l'utilisation de technologies avancées et innovantes pour l'identification des bois précieux ; sur l'application de l'ingénierie à la gestion forestière ; sur la collaboration entre académies et industries en génie civil, et sur la valorisation du bambou en construction.
- Conférence et visite de laboratoires à l'université d'Edinburgh : ayant permis de se connaître et de développer des projets de recherche en collaboration.
- Atelier sur « la résilience des structures traditionnelles en bois face aux cyclones » animé par les chercheurs de l'University of Edinburgh, à destination des enseignants des 5 établissements malgaches d'enseignement partenaires.
- Conférence internationale IUFRO sur les bois tropicaux : sur le thème « Advancing the Sustainable Use of Tropical Forests ». Cet événement a rassemblé 104 participants, dont 81 locaux et 23 experts internationaux venus de pays tels que le Brésil, la Côte d'Ivoire, la République Démocratique du Congo, la Tanzanie, le Kenya, la France, le Royaume-Uni, la Guyane française, et la Chine. La conférence a porté sur cinq thèmes clés : l'identification et la traçabilité des bois tropicaux, les innovations dans la construction en bois, le bois énergie, la gestion durable des forêts et les produits forestiers non ligneux. Elle a servi de plateforme pour partager des résultats de recherche, explorer des opportunités de collaboration, et souligner l'importance de la coopération internationale dans la gestion responsable des ressources forestières.

## Résultats

Les résultats de toutes ces activités mis en œuvre dans le cadre du projet ForesTIA sont résumés dans le Tab. 1, en précisant les nombres des activités réalisées, et le nombre d'enseignants et étudiants concernés dans chaque activité.

Tab .1 : Bilan des réalisations du projet ForesTIA

Objectifs fixés au départ du projet	Objectifs à la fin du projet
MoU signé	2 MoU signés : 1 avec les partenaires académiques, 1 avec l'Université d'Édimbourg.
Détachement d'enseignants	15 enseignants en détachement en industries
Stage d'étudiants (3 mois)	20 étudiants en stage en industrie
Stage d'étudiants (1 mois)	45 étudiants en stage en industrie
Training School	1 Training school réalisé sur le thème « la résilience des structures traditionnelles en bois face aux cyclones », avec 25 participants.
Conférences	11 conférences organisées, avec 397 étudiants participants.
Visites industrielles	19 visites organisées, impliquant 500 étudiants.
Voyages au Royaume-Uni	4 voyages réalisés, incluant visites d'infrastructures et conférences.
Ateliers de partage de connaissances	4 ateliers réalisés sur l'identification du bois précieux, la gestion forestière, le génie civil, et le bambou.
Label IUFRO	La conférence internationale sur les bois tropicaux labellisée par IUFRO (Unité 5.01.00 - Qualité du Bois et des Fibres).
Conférence internationale	Conférence internationale sur les bois tropicaux (ICTW) sur le thème « Advancing the Sustainable Use of Tropical Forests ». Cet événement a rassemblé 104 participants, dont 81 locaux et 23 experts internationaux.
Groupement de l'industrie du bois	Statut établi pour l'association des acteurs de l'industrie du bois, rapprochement entre les différents acteurs de la filière bois et le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
Suivi sur les réseaux sociaux	Plus de 1 100 followers sur Facebook



Fig.1 : Visites de laboratoires



Fig.2 : Détachement en entreprise et ateliers



Fig.3 : Photo de groupe - Conférence internationale IUFRO sur les Bois tropicaux, ICTW 2024

Après la fin du projet, les compétences acquises par les enseignants demeurent et seront transmises aux futures générations d'étudiants. Leur approche pédagogique s'est également enrichie et adaptée aux besoins des industriels grâce à ces nouvelles compétences. Comme perspective, il serait pertinent de renforcer les partenariats avec davantage d'industries, locales et internationales, pour offrir des opportunités de stages et d'acquisition de compétences plus diversifiée.

### Remerciements

Sincères remerciements pour le bailleur du projet ForesTIA : Royal Academy of Engineering (Royaume-Uni), pour avoir permis la réalisation de toutes ces activités de Novembre 2022 à Août 2024.

Vifs remerciements aux partenaires académiques dans le projet : Mention Foresterie et Environnement de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo, School of Engineering of the University of Edinburgh, Institut Supérieur de Technologie Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique Antsiranana, Centre National de Formation de Techniciens Forestiers Angavokely, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, Tropical Wood, Les Scieries du Betsileo, Hazovato, Laboratoire National des Travaux Publics, Idom'Art, Open Systems Lab,

Sincères remerciement aussi aux partenaires et sponsors pour la réalisation de la conférence internationale sur les bois tropicaux ICTW : MESUPRES (Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique), MEDD (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable), IUFRO (International Union of Forest Research Organization), GDR Sciences du Bois, Bois et Forêts des tropiques, CIRAD, DP Forêts & Biodiversité, GIZ, DIGITAG, G3D2 (Gestion Durable des bois précieux *Dalbergia* et *Diospyros* de Madagascar), BIODEV Madagascar Consulting, ACEP Group, TELMA, GFSA (Gasy Forestry Students Association).

## Projet RESTWOOD : Émergence d'une filière pour le réemploi du bois de structure

REBHI Amal<sup>1</sup>, COUREAU Jean-Luc<sup>1</sup>, GARNESSON Thomas<sup>2</sup>, DE HAECK Maxime<sup>2</sup>,  
GALIMARD Philippe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Département Environnement et Génie Civil (GCE), Université de Bordeaux, Talence, France

<sup>2</sup> NOBATEK/INEF4, Institut pour la transition énergétique du Bâtiment, Anglet, France  
[amal.rebhi@u-bordeaux.fr](mailto:amal.rebhi@u-bordeaux.fr)

**Mots clés :** structure bois ; réemploi ; qualification mécanique, classement visuel ; Essais non destructifs ; Essais destructifs ;

### Introduction

Le réemploi de matériaux de construction, en particulier le bois de structure, s'inscrit dans une démarche de durabilité, visant à réduire les déchets et les importations de bois. En Nouvelle-Aquitaine, 300 000 à 400 000 tonnes de déchets de bois de classe B sont produits chaque année, alors que la France importe 75 % du bois d'œuvre pour la construction. La réglementation environnementale RE 2020 impose des contraintes sur les émissions de gaz à effet de serre des matériaux de construction, augmentant la demande en bois. Cependant, le réemploi des structures bois est limité par l'absence de garanties sur leur performance mécanique. Des initiatives comme le projet SPIROU visent à sécuriser ces pratiques en créant des exigences adaptées pour le bois de structure issu du réemploi.

Afin de répondre aux enjeux de réduction de l'empreinte environnementale et de limiter la pression sur les ressources forestières françaises, le projet Restwood vise à créer une filière dédiée au réemploi du bois de structure, capable de fournir du bois réemployé avec une qualification équivalente à celle du bois neuf. Toutefois, pour que le bois réemployé puisse être utilisé à des fins structurelles, il est crucial de disposer d'une méthode fiable pour classer ce matériau vis-à-vis de ses performances mécaniques. Les normes actuelles de classement visuel, conçues pour le bois neuf, tendent à déclasser le bois récupéré en raison de défauts plus fréquents, tels que des fissures et des déformations (Davis 2012, Cruz et al. 2015, Inguez-Gonzalez et al. 2019). Ces normes sont généralement adaptées à des bois issus d'espèces spécifiques et de régions de croissance bien définies, ce qui est difficile à appliquer au bois récupéré, dont l'origine est difficile à déterminer.

L'objectif est donc de développer une méthode de classement spécifique aux composants structuraux en bois issus des chantiers de déconstruction, en se basant sur les normes existantes (telles que la norme française NF B52-001-1 (2018) pour le bois neuf, la norme norvégienne prNS 3691 (2024) pour le bois de réemploi, et la norme australienne pour le bois massif réemployé (Crews et al. 2008)). Des essais expérimentaux, basés sur des tests de flexion selon la norme EN 408 (2012), permettront de corréliser les critères visuels à la performance mécanique réelle du bois issu du réemploi, dans le but d'ajuster les méthodes existantes pour améliorer la prédiction des performances de ces éléments.

On cherchera également des approches plus scientifiques pour apporter des modélisations capables de prédire plus pertinemment la qualité mécanique de ces éléments structuraux issus du réemploi.

## Méthode de travail

Pour atteindre l'objectif de ce projet, il est essentiel de suivre une méthodologie de travail clairement définie et illustrée dans le schéma suivant (Fig. 1).

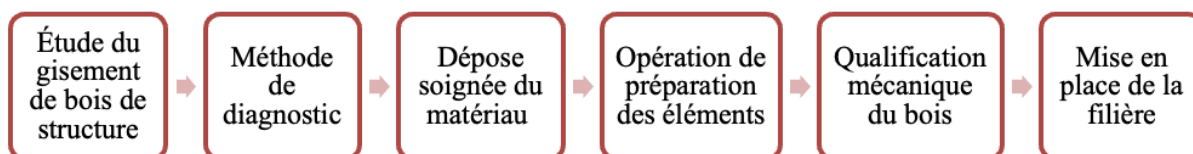


Fig. 1 : Méthodologie de travail à suivre

La première étape consiste à caractériser le gisement de bois de structure réemployable. En s'appuyant sur des études antérieures, comme l'étude GDBAT menée par le FCBA (2022), il a été révélé qu'en 2019, la France a généré 2,3 millions de tonnes de déchets de bois provenant des chantiers. En Nouvelle-Aquitaine, environ 21 756 tonnes de bois de structure proviennent chaque année des opérations de déconstruction. Si l'on considère que 30 % de ce bois est réemployable, cela représente 6 103 tonnes (soit 12 206 m<sup>3</sup>), avec un potentiel de chiffre d'affaires de 6,1 millions d'euros. Le projet Restwood se concentre sur les éléments réemployables tels que les poutres et poteaux, en excluant les panneaux et les éléments dégradés. Dans une deuxième phase, l'analyse du gisement se poursuit par une étude de terrain. Plusieurs chantiers de déconstruction (Fig.2 à 5) sont analysés pour identifier de manière plus qualitative le bois collectable pour un réemploi.



Fig.2 : Bâtiments à déconstruire de la maison des générations à Eysines



Fig. 3 : Vue Général de la charpente du local de l'hôpital Bagatelle



Fig. 4: Chantier de Floirac



Fig. 5: Vue général de la charpente bois à Begles

La deuxième étape concerne l'étude de diagnostic, qui vise à identifier, quantifier et évaluer la qualité des éléments de bois avant la déconstruction. Cela inclut une inspection visuelle (identification du type d'élément, état général, présence de défauts et endommagements, types d'assemblages, ...) et une caractérisation in situ (relevé des dimensions, mesure de teneur en eau, identification de l'essence, ...). L'historique des bâtiments est également pris en compte pour mieux comprendre les conditions d'utilisation du bois et les approvisionnements initiaux.

Ensuite, la dépose du matériau nécessite une déconstruction soignée pour préserver les éléments, suivie d'un tri selon leurs caractéristiques, puis d'un transport et d'un stockage adéquats pour éviter toute détérioration. Cette dépose doit être étudiée également dans ses protocoles. Le bois est ensuite préparé avant sa réutilisation : les éléments métalliques sont retirés, les surfaces nettoyées, et le bois est séché, soit naturellement, soit artificiellement, pour stabiliser son humidité. Des traitements supplémentaires peuvent être appliqués pour améliorer sa résistance, notamment contre les attaques fongiques et d'insectes.

Enfin, l'enjeu scientifique de ce projet est de développer une méthode robuste pour évaluer mécaniquement le bois réemployé. Cette étude se concentre spécifiquement sur la qualification mécanique du bois massif destiné au réemploi en structure.

### **Qualification mécanique du bois récupéré**

Pour réutiliser le bois dans des structures, un classement "expert" est requis pour définir un produit pour la construction. Des études, telles que celles de Llana et al. (2023) et de Ranta-Maunus et al. (2011), montrent que le bois récupéré peut avoir des propriétés mécaniques comparables aux bois "neufs", notamment en termes de module d'élasticité (MOE). Toutefois, la résistance à la flexion (MOR) est généralement inférieure, ce qui souligne l'importance d'adapter les seuils de qualification de cette nouvelle ressource.

Des normes existantes, comme la prNS 3691 (2024) en Norvège, régissent l'évaluation du bois récupéré. Cette norme se divise en trois parties :

- prNS 3691-1 : couvre les exigences générales pour le traitement, le stockage et l'évaluation du bois, en garantissant notamment que l'humidité ne dépasse pas 20 % et que les défauts géométriques soient limités.
- prNS 3691-2 : traite de l'évaluation des impuretés, notamment la présence de substances dangereuses (chrome, arsenic, PCB) et d'autres contaminants comme les métaux ou plastiques.
- prNS 3691-3 : établit les critères pour le classement visuel du bois récupéré, en tenant compte des défauts naturels et des dommages antérieurs comme les trous, fissures ou biodégradations.

En Australie, la norme provisoire « Interim Industry Standard » vise également à définir des critères de classification visuelle pour le bois de réemploi. Elle prend en compte les propriétés spécifiques des essences, les défauts naturels et ceux causés par une utilisation antérieure. Les classes mécaniques attribuées s'appuient sur ces critères pour garantir la sécurité et la performance du bois dans des applications structurelles.

Pour mettre en place une méthode de classement visuel dans le cadre de RESTWOOD, il est essentiel de suivre un plan de travail structuré, comprenant les étapes représentées dans le schéma de la Fig. 6. Cette méthode repose sur trois phases. La première consiste à s'appuyer sur les méthodes de classement visuel existantes, telles que la norme française NF B52 001-1 (2018) pour le bois neuf, la norme norvégienne pour le bois massif récupéré, et la norme australienne. Ces méthodes seront appliquées sur trois lots de bois différents : un lot de résineux, un lot de feuillus et un lot de lamellé-collé. Ensuite, un classement par machine sera effectué à l'aide de la machine XyloClass (plateforme XYLOPLATE Université de Bordeaux). Les résultats de ces méthodes seront comparés avec ceux des essais destructifs expérimentaux de grandes dimensions qui permettent de définir la performance réelle des éléments.

Sur la base de l'analyse des résultats expérimentaux, il sera possible de proposer des adaptations ou des calibrations des méthodes de classement actuelles pour des applications sur le bois issu



du réemploi et de proposer des modèles de comportement pour la compréhension des performances. On peut considérer la variabilité des propriétés physiques des essences réemployées, des défauts non pris en compte ou les limitations des méthodes de caractérisation actuelles.

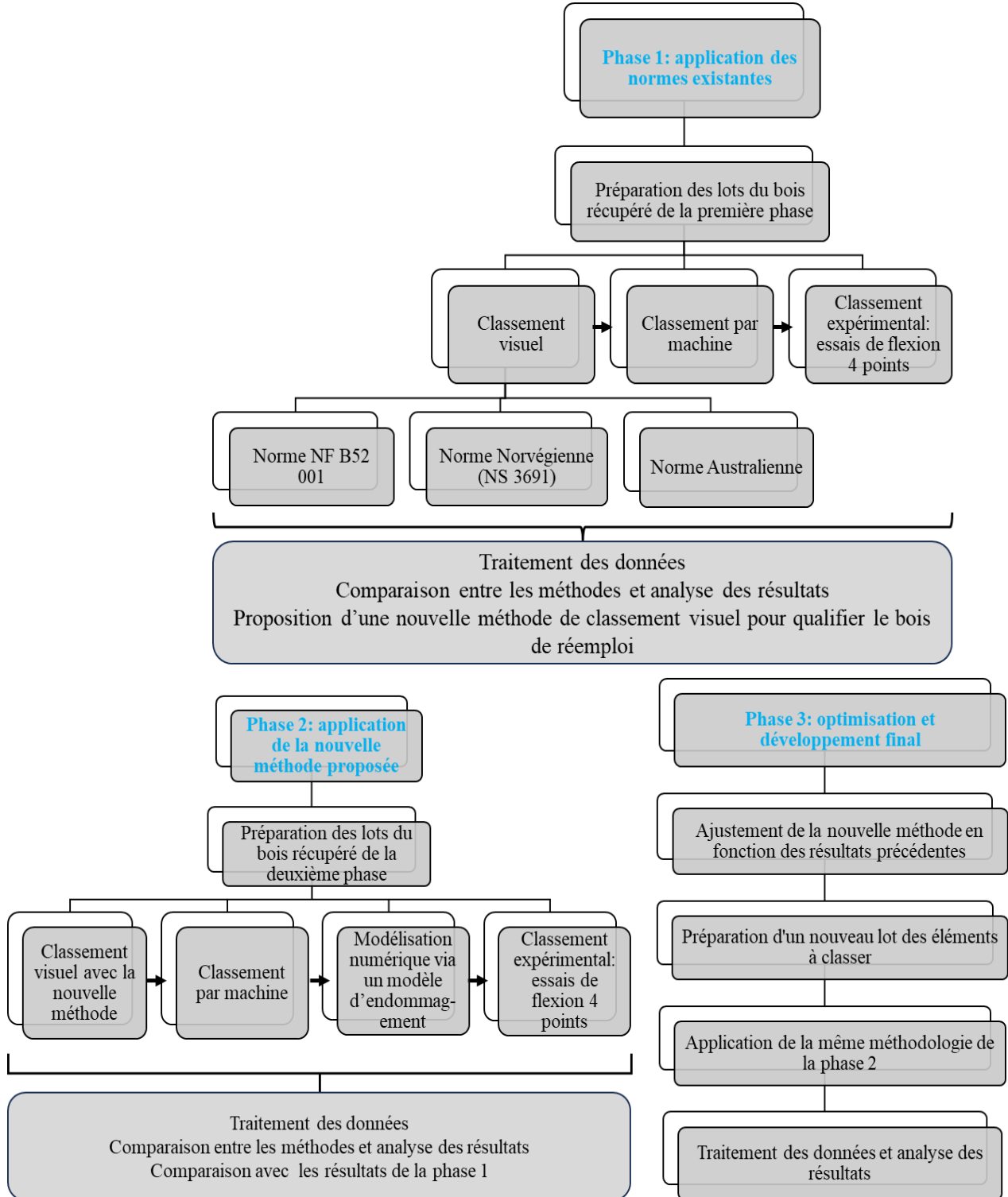


Fig. 6 : Méthode de qualification mécanique du bois de réemploi

L'objectif de la deuxième phase consistera à intégrer des modèles et outils de contrôle non destructif (CND), ainsi que des essais mécaniques en flexion à quatre points, afin de mieux

évaluer la qualité des lots de bois réemployé. Cette comparaison permettra d'évaluer l'efficacité de cette nouvelle approche en termes de fiabilité et de précision, et d'identifier les outils issus des recherches récentes les plus pertinents pour la qualification des bois. La troisième phase visera ensuite à optimiser cette méthode hybride pour améliorer les performances de prédiction.

De plus, il est envisagé de développer des démarches pour valoriser les bois massifs en réemploi mais aussi de développer des critères de réemployabilité pour la fabrication de composites structuraux biosourcés.

## Conclusion

Le projet RESTWOOD s'inscrit dans une démarche de durabilité et d'innovation, visant à relever les défis environnementaux et économiques associés au réemploi du bois de structure. En élaborant des méthodes de classement adaptées au bois récupéré, ce projet cherche à réduire les verrous technologique et idéologiques pour une utilisation dans le génie civil.

La méthodologie proposée, qui associe classement visuel, classement par machine et essais expérimentaux et modélisation constitue une approche rigoureuse et pragmatique pour établir une nouvelle méthode de classement. Cette démarche peut favoriser le développement d'une filière de réemploi durable du bois, contribuant ainsi à la réduction des déchets et à une moindre dépendance aux importations, tout en respectant les exigences de la réglementation environnementale RE 2020.

## Références

Davis J (2012) Suitability of salvaged timber in structural design, Massachusetts Institute of Technology.

Cruz H, Yeomans D, Tsakanika E, Macchioni N, Jorissen A and Touza M and Mannucci M, Lourenço P (2015) Guidelines for on-site assessment of historic timber structures, *International Journal of Architectural Heritage*, p. 277-289.

Iniguez-Gonzalez G, Arriaga F, Osuna-Sequera C, Esteban M and Ridley-Ellis D (2019) Nondestructive measurements in reclaimed timber from existing structures, *Proceedings of the 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Freiburg im Breisgau, BW, Germany, p. 462-472.

NF B52-001-1 (2018) Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif.

NF EN 408 (2012) Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

FCBA (2022) Gestion des Déchets Bois du Bâtiment - GDBAT. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fcba.fr/ressources/gdbat-gestion-des-dechets-de-produits-de-construction-bois-enfin-de-vie/>.

Llana D, Iniguez-Gonzalez G, Plos M and Turk G (2023) Grading of recovered Norway spruce (*Picea abies*) timber for structural purposes, *Construction and Building Materials*, p. 132-440.

Ranta-Maunus A, Denzler J, Stapel P (2011) Strength of European Timber: Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project, VTT Technical Research Centre of Finland.

prNS 3691 (2024) Evaluation of recycled wood, Norwegian Standard.

Crews K, Hayward D, MacKenzie C (2008) Interim industry standard recycled timber--visually stress graded recycled timber for structural purposes, Google Scholar, Australia, 61 p.

## Comportement différé des porteurs verticaux aux états limites de service

DUBOIS Frédéric, POP Octavian

Université de Limoges, GC2D, UR 14477, 19 300 Egletons, France

[frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

**Mots clefs :** Essais de fluage, Viscoélasticité, Eurocode 5, Etat Limite de Service, Etat Limite Ultime

### Contexte et objectifs

Ce travail traite du comportement à long terme des éléments en bois dans une approche réglementaire touchant à la fois les états limites de service et ultimes. Les ouvrages en bois en service sont sujets aux effets de fluage dus principalement aux charges de longue durée telles que le poids propre. Ces effets différés s'expriment notamment par un comportement au fluage se traduisant, dans une approche Eurocode, par un coefficient d'amplification des déplacements à long terme (coefficient  $k_{def}$ ) et des coefficients minorateurs prenant en compte la classe de durée de charge. De récents travaux montrent que les effets de fluage à long terme dépendent de la nature de la sollicitation (flexion vs compression par exemple). Il est donc important d'avoir une maîtrise de ces coefficients pour concevoir des constructions innovantes en bois telles que des ouvrages d'art ou des bâtiments de grande hauteur. De plus, les effets de fluage impactent les paramètres de résistance à travers le coefficient  $k_{mod}$ . Il est donc nécessaire de déterminer, à l'aide d'essais de fluage ou à partir de données réglementaires, des valeurs de pondération prenant en compte, non seulement, la classe de service ou la classe de durée de charge mais également la nature de la sollicitation.

### Matériel et méthode

#### *Dispositif de chargement*

Du point de vue expérimental, ce travail repose sur un chargement en fluage de poteaux en bois lamellé-collé à échelle réduite (75 cm de hauteur,  $10 \times 20$  cm<sup>2</sup> de section transversale) de classe GL24h à une valeur de contrainte égale à 30% de la contrainte caractéristique en compression axiale correspondant à un effort de compression de 144 kN. Le banc de fluage, Fig.1 permet d'effectuer 5 répétitions de l'essai. Le chargement passif repose sur un déplacement imposé (vis de chargement) corrigé des effets de relaxation via un capteur de force. Le tout est placé dans une enceinte climatique régulée en température (20 °C) et en humidité relative (65% HR) pour se placer dans une configuration se rapprochant de la classe de service n°1 selon l'Eurocode 5.

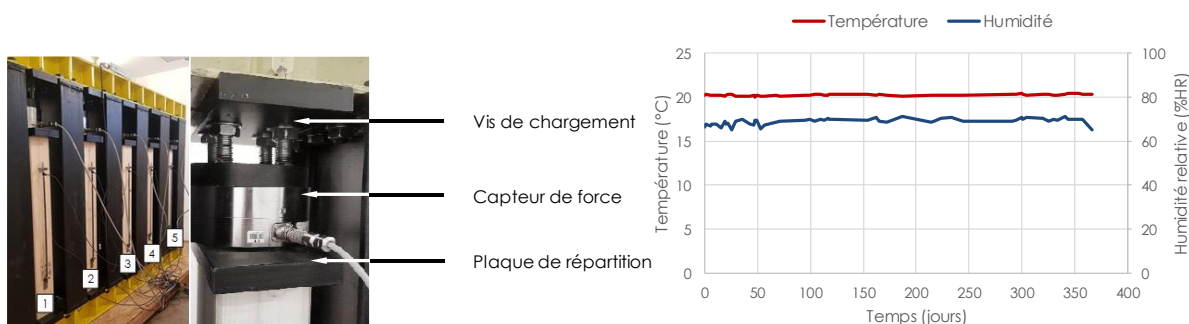


Fig. 1 : Dispositif de fluage, mesure de pression et régulation climatique

La déformation moyenne de fluage axiale est mesurée via un capteur de déplacement résistif sur une longueur de référence de 50 cm afin de moyenner la déformation sans subir les effets de bords dus aux contacts des plaques de répartition. Afin d'éliminer les effets de reprise d'humidité induits par le conditionnement des échantillons avant mise en charge, il a été préféré à un chargement de type fluage-recouvrance, Fig. 2. La temporalité des essais est d'une année.

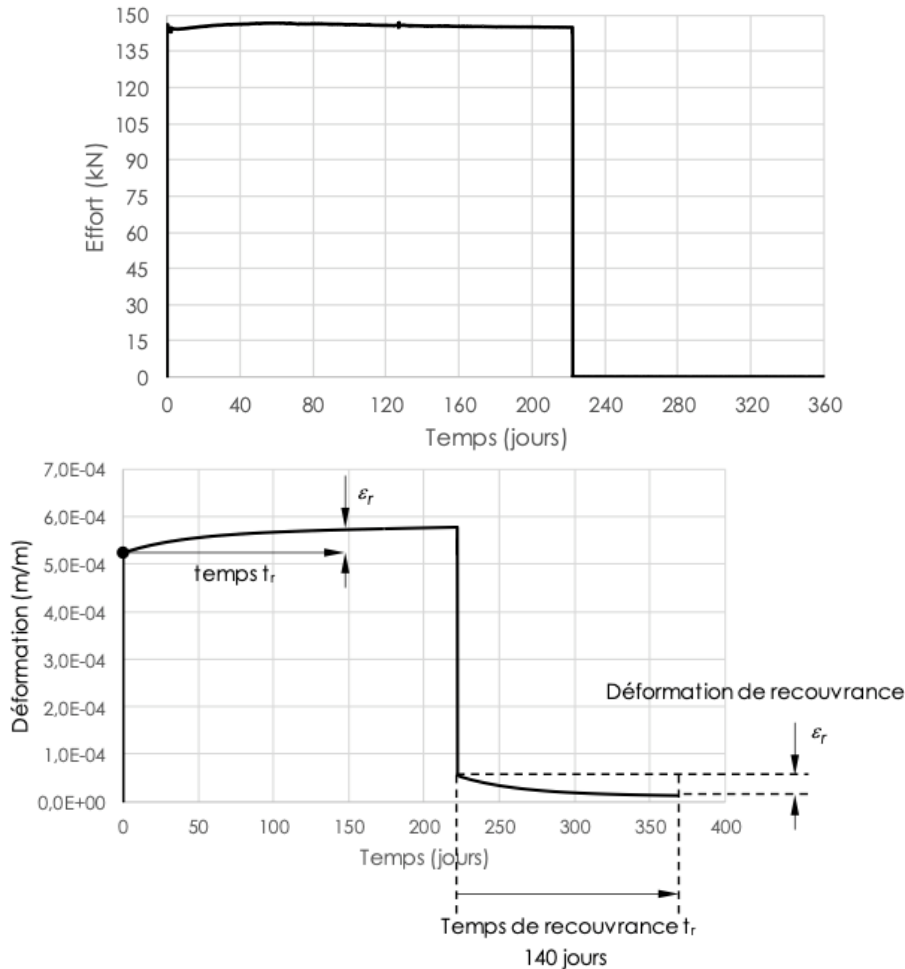


Fig. 2 : Principe de l'essai de fluage-recouvrance

### Analyse des données

Le comportement mécanique en fluage recouvrance repose sur le formalisme de Boltzmann qui permet de relier, dans une vision uniaxiale, la contrainte  $\sigma(t)$  et la déformation  $\varepsilon(t)$  selon l'expression suivante :

$$\varepsilon(t) = J(t-t_0) \cdot \sigma_0 - J(t-t_1) \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

où  $J(t)$  représente la fonction de fluage,  $t_0$  désigne le temps 'théorique' de début de chargement et  $t_1$  le temps de déchargement. La modélisation par décomposition spectrale est bien adaptée pour représenter un essai de fluage recouvrance (Dubois, 1997). Cette décomposition permet de représenter une fonction de fluage par l'expression suivante :

$$J(t) = \frac{1}{E_L} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^3 A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (2)$$

où  $E_L$  représente le module d'Young longitudinal instantané corrigé de l'humidité (Guitard, 1987),  $\lambda_m$  sont des constantes représentatives des temps caractéristiques de chaque terme de la

série fixés à 180, 240 et 360 jours. Dans ces conditions, une optimisation des paramètres des expressions (1) à (2) permet une bonne interpolation et un lissage des données expérimentales, Fig. 3.

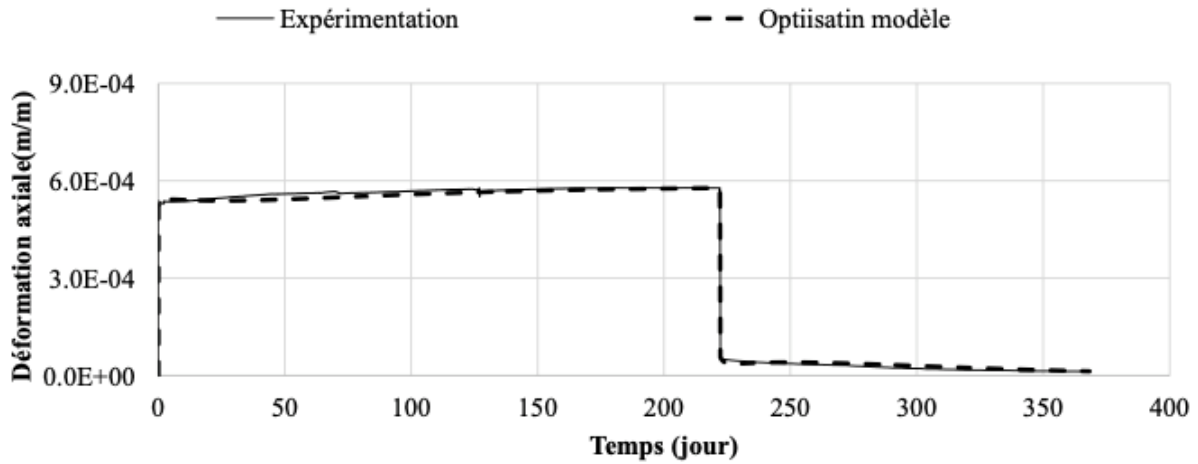


Fig. 3 : Interpolation par optimisation modèle

Afin d'obtenir des données de fluage à 50 ans correspondant à la durée d'application d'une charge permanente, il est nécessaire d'établir une extrapolation de la fonction de fluage optimisée précédemment après une durée expérimentale d'une année. Pour cela, nous proposons d'utiliser une particularité du comportement viscoélastique linéaire. Pour des temps longs, au-delà du fluage primaire, l'évolution de la déformation en fonction du temps, dans une représentation Log/Log, tend vers une forme linéaire, telle que :

$$\ln(\varepsilon(t)) = a \cdot \ln(t) - b \quad (3)$$

Il est nécessaire, dans un premier temps, de définir la zone de linéarité afin d'en proposer une extrapolation, Fig. 4, ce qui permet de déterminer les valeurs optimales pour les coefficients de régression linéaire  $a$  et  $b$ .

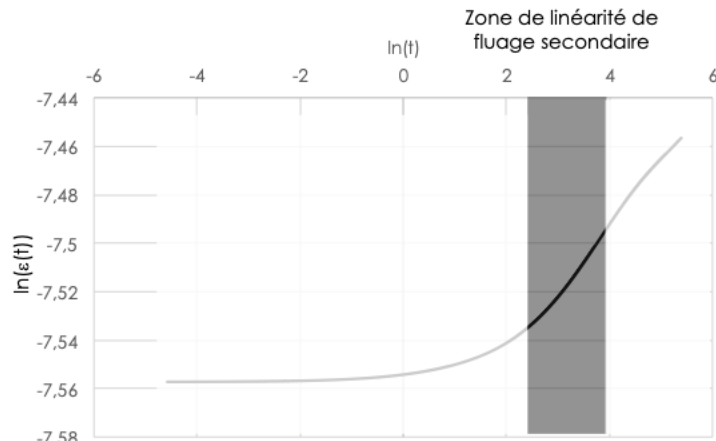


Fig. 4 : Zone de linéarité en phase de fluage secondaire

Une seconde décomposition spectrale repose sur une forme similaire à l'expression (3) en fixant les temps caractéristiques en accord avec les classes de durée de charge, à savoir, 7 jours, 6 mois, 10 ans et 50 ans (Dubois 2012, Varnier 2019) :

$$J(t) = \frac{1}{E_L} \cdot \left[ 1 + \sum_{m=1}^4 A_m \cdot (1 - \exp(-\lambda_m \cdot t)) \right] \quad (4)$$

L'équation (4) permet de faire le lien avec le coefficient d'amplification de fluage  $k_{def}$ , selon l'expression suivante (équation 5) :

$$k_{def} = \sum_{m=1}^4 A_m \quad (5)$$

Les différents paramètres de l'équation (4) font l'objet d'une optimisation numérique dont les résultats sont présentés en Fig. 5 dans laquelle chaque point correspond au fluage déterminé pour chaque classe de durée de charge.

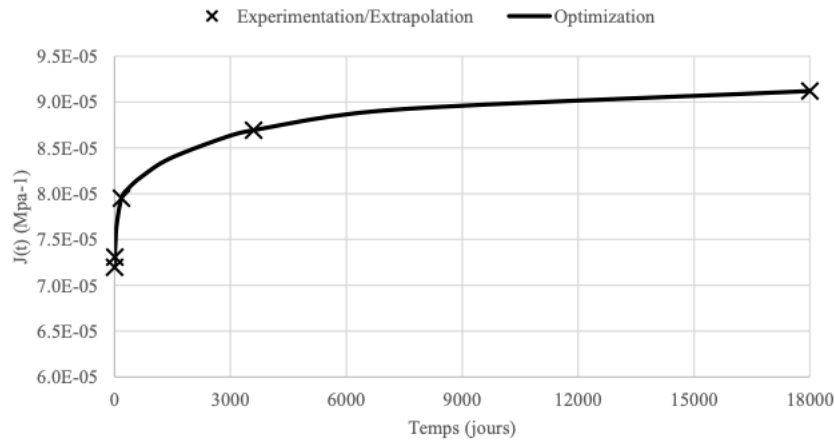


Fig. 5 : Fonction de fluage extrapolée à 50 ans

### Résultats et discussion

L'ensemble du protocole expérimental et d'analyse des données est appliqué au 5 échantillons testés. L'optimisation pilotée par l'équation (4) donne les valeurs de fluage à chaque classe de durée de charge (Tab. 1) permettant d'en déduire, d'une part, les constantes  $A_m$  et, d'autre part le coefficient d'amplification de fluage  $k_{def}$  (Tab. 2).

Tab.1 : Valeurs de fluage données en MPa<sup>-1</sup> selon les classes de durée de charge

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
1 semaine	$7,61 \cdot 10^{-5}$	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$7,31 \cdot 10^{-5}$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	$7,44 \cdot 10^{-5}$
6 mois	$7,90 \cdot 10^{-5}$	$7,70 \cdot 10^{-5}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-5}$	$8,16 \cdot 10^{-5}$
10 ans	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$8,50 \cdot 10^{-5}$	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-5}$
50 ans	$8,56 \cdot 10^{-5}$	$8,95 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-5}$	$9,10 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$

Tab.2 : Paramètres d'optimisation et valeurs de  $k_{def}$

	Poteau 1	Poteau 2	Poteau 3	Poteau 4	Poteau 5
$A_1$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$5,64 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$
$A_2$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$9,24 \cdot 10^{-2}$	$9,32 \cdot 10^{-2}$	$8,36 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$
$A_3$	$3,65 \cdot 10^{-2}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$6,32 \cdot 10^{-2}$	$6,95 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$
$A_4$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$
$k_{def}$	0,16	0,29	0,27	0,28	0,28

Si nous faisons abstraction de l'échantillon n°1, nous observons 4 bonnes répétitions des résultats de l'analyse proposée. Pour des éléments en lamellé-collé de résineux, le coefficient  $k_{def}$  converge vers une valeur de 0.3, contre une valeur de 0.6 fixée pour les éléments en flexion.

## Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'identifier, après un an d'essais de fluage, le comportement à long terme des éléments en bois sous sollicitation de compression axiale. La sollicitation de fluage-recouvrance permet de mieux appréhender la mesure de la déformation instantanée à un mi-temps expérimental garantissant, de plus, une stabilisation de l'humidité interne dans l'enceinte climatique. Ce travail a permis également de montrer le potentiel de l'approche modèle et expérimentale dans l'opération d'extrapolation du comportement différé à 50 ans. Un traitement supplémentaire des données a permis de traiter la question du coefficient  $k_{mod}$  modulant la résistance de calcul en compression en fonction de la classe de durée de charge. Le travail réalisé s'est limité à une classe de service n°1 en relation de l'usage des porteurs verticaux dans des immeubles de grande hauteur. Cependant, pour être exhaustif, ce travail mérite d'être complété par une étude similaire à d'autres niveaux d'humidité (Varnier 2018). Également, les solutions architecturales retenues peuvent placer ces porteurs dans des conditions de faible humidité interne (effet de serre derrière des vitrages).

En termes de perspectives, la limitation des sections des porteurs verticaux (pour les premiers niveaux des immeubles de grande hauteur) demande de choisir des solutions en lamellé-collé avec des résistances caractéristiques plus élevées. Une solution consiste à utiliser des bois de la famille des feuillus. Le travail présenté pourra être employé pour étudier le comportement au fluage de porteurs verticaux de chêne ou de hêtre (Manfoumbi 2012). Également, cette étude sera complétée par une étude du transfert hydrique en surface afin de mettre en exergue les risques de fissuration par séchage extrême. Cela fait l'objet des travaux amorcés dans le cadre du projet ADEME France 2030 intitulé « Pot-Eau\_Feu ».

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'association ADIVBOIS qui a financé cette étude et qui a permis d'ouvrir d'autres pistes exploratoires pour la valorisation de l'usage du bois dans de grands ouvrages comme les immeubles de grande hauteur.

## Références

- Dubois F (1997) Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : Application au matériau bois, thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 149 p.
- Dubois F, Husson JM, Sauvat N, Manfoumbi N (2012) Modeling of the viscoelastic, mechano-sorptive behavior in wood, *Mechanics of Time Dependent Materials*, 16(4): 439-460.
- Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, éd. Cépadues, 240 p.
- Manfoumbi N (2012) Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement, thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 296 p.
- Varnier M, Sauvat N, Monterro C, Dubois F, Gril J (2018) Adaptation of Eurocode 5 standard to French hardwoods - Proposal of new hygroscopic equilibrium charts, 5th INTER meeting, Tallinn, Estonia, 13-16.08.2018.
- Varnier M (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 245 p.

## ReCoWood : Développement d'un démonstrateur automatisé éco-responsable pour le recyclage du bois de construction

BAKLOUTI Sana<sup>1</sup>, BELLONCLE Christophe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ecole Supérieure du Bois, Laboratoire Innovation Matériaux Bois Habitat (LIMBHA),  
Nantes, France

[Sana.Baklouti@esb-campus.fr](mailto:Sana.Baklouti@esb-campus.fr) , [Christophe.Belloncle@esb-campus.fr](mailto:Christophe.Belloncle@esb-campus.fr)

**Mots clés :** Recyclage en boucle fermée du bois ; Démonstrateur automatisé ; Optimisation des processus

### Contexte et objectifs

Le bois est une ressource renouvelable essentielle, utilisée à la fois comme matière première et pour la production d'énergie (Belloncle et Michaud 2019). Les déchets de bois provenant de la démolition de bâtiments et de meubles contiennent une quantité significative de matériaux lignocellulosiques susceptibles d'être réutilisés. En France et en Europe, une part notable de ces déchets est valorisée sous forme de panneaux de particules ou utilisée pour la production d'énergie. Cependant, une proportion importante est encore mise en décharge ou incinérée, ce qui limite le potentiel de réutilisation du bois massif dans de nouvelles applications (Pigorsch 2014).

Dans ce contexte, le projet **ReCoWood** vise à développer un démonstrateur automatisé éco-responsable pour le recyclage du bois de construction, s'inscrivant dans une démarche de recyclage en boucle fermée. L'objectif principal est d'intégrer les déchets de bois en entrée de la chaîne de production, notamment pour la fabrication de produits en bois lamellé-collé (Fig. 1), tout en adoptant une approche d'éco-conception. Le projet ReCoWood constitue une extension des travaux réalisés dans le cadre du projet européen CareWood, mené par le FCBA et l'ESB (Irle et al 2015).



Fig. 1 : le projet de la matière première au produit. Crédit photo : MINCO

### Matériel et méthode

L'approche de ReCoWood repose sur le développement d'un démonstrateur technologique automatisé capable de recycler efficacement le bois de démolition tout en minimisant les interventions manuelles. Le projet intègre des capteurs avancés et des machines de pointe pour créer une ligne de transformation du bois résiduel à l'échelle industrielle. Les partenaires du



projet collaborent pour atteindre cet objectif : CHARIER TDD s'occupe de la collecte et de la qualification des matières premières, principalement le bois de démolition ; LIMBHA (ESB) est responsable de la décontamination du bois entrant, de la conception de l'architecture matérielle du démonstrateur et des protocoles de communication ; WEINIG coordonne les machines pour la production des éléments en bois ; MINCO et GASCOGNE BOIS participent à la validation industrielle et à l'application des produits recyclés ; enfin, le FCBA réalise les analyses de cycle de vie (ACV) et produit les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). Cette collaboration synergique permet de créer un processus intégré et durable pour le recyclage du bois de construction.

### Résultats et discussion

Un travail initial a permis d'identifier les gisements de bois de démolition, constituant une étape cruciale pour l'approvisionnement en matières premières. L'architecture matérielle du démonstrateur a été élaborée, les machines ont été sélectionnées et le processus de transformation a été défini. Les premiers essais effectués sur des lots de bois ont validé l'efficacité du processus proposé. De plus, trois menuiseries réalisées à partir de bois ReCoWood ont été produites avec succès (Fig. 2), démontrant la faisabilité technique de l'approche adoptée. Des tests expérimentaux ont également été menés sur les produits de menuiserie et les planches fabriquées, confirmant leur conformité avec les normes en vigueur.



Fig. 2 : Exemple de menuiserie réalisée avec un produit ReCoWood. Crédit photo : MINCO

La qualification complète du bois de démolition est en cours afin de garantir son adéquation avec les exigences du processus de production. Des tests supplémentaires sont planifiés pour affiner les résultats et assurer la robustesse et la fiabilité des produits finaux. Par ailleurs, la réalisation des analyses de cycle de vie (ACV) et la création des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) sont en cours, dans le but de garantir la transparence environnementale des produits ReCoWood.

### Conclusion et perspectives

Le projet ReCoWood progresse conformément aux objectifs fixés, en mettant l'accent sur l'optimisation des processus et la minimisation de l'empreinte environnementale. Les prochaines étapes incluent la finalisation du démonstrateur et la validation complète du

processus sur une ligne automatisée. Ces avancées permettront une gestion plus efficace des ressources en bois, renforçant le modèle de recyclage en boucle fermée dans l'industrie du bois de construction. ReCoWood aspire à devenir une référence en matière d'innovation technologique et d'éco-conception pour le recyclage du bois, contribuant ainsi à un développement durable et responsable de l'industrie.

### **Références**

Belloncle C, Michaud F (2019) La valorisation de la ressource fibreuse en fin de vie : déchets bois et dérivés Caractéristique, gestion et potentialité de la ressource. Dans Chimie pour la transformation durable de la ressource lignicellulosique, Presse Universitaire Bordeaux.

Pigorsch E (2014) Sorting of waste wood by NIR imaging techniques. Proc. Sensor-Based Sorting, 127-136.

Irle M, Privat F, Deroubaix G, Belloncle C (2015) Intelligent recycling of solid wood. PRO LIGNO, 11(4), pp. 14-20.

## Valorisation des sciures de MDF pour un composite imprimable en 3D

RAMAUX Johan<sup>1,2,3</sup>, NOUVEL Cécile<sup>2</sup>, ZIEGLER-DEVIN Isabelle<sup>3</sup>, BESSERER Arnaud<sup>3</sup>, Benjamin BONNOT<sup>4</sup>, NOYEL Mélanie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Acta Mobilier, 7 Rue de Madrid, 89470 MONETEAU

<sup>2</sup> Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

<sup>3</sup> LERMAB, Université de Lorraine, GP4W, F 54 000 Nancy, France

<sup>4</sup> Scan Reality, 305 Rue de la Roche Guérin, 88000 DINOZE

[johan.ramaux@univ-lorraine.fr](mailto:johan.ramaux@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Impression 3D ; Recyclage ; Panneaux de Fibres de Densité Moyenne (MDF) ; Procédés

### Contexte

La production de déchets bois et la tension sur la matière première pour les différents besoins de l'industrie sont en constante augmentation. La production de déchets bois a atteint 240 millions de mètres cubes en 2020 (FAO 2022). Par ailleurs, bien que diverses méthodes de valorisations existent, comme l'incorporation dans des composites thermoplastiques ou encore l'extraction de molécules à haute valeurs ajoutées, le réemploi de la ressource n'est pas total et nécessite la création de nouvelles filières de recyclage (Pandey 2022). Parmi les techniques de recyclage pour la création de composites plastiques à base de bois, une nouvelle technologie prometteuse est en train d'émerger : la fabrication additive (plus communément appelée impression 3D). L'impression 3D permet, en plus d'offrir des possibilités de création presque sans limites, de pouvoir utiliser une vaste source de matières premières, incluant l'utilisation de composites plastique/bois. Cette technique est donc un moyen peu coûteux de réutiliser les déchets de biomasse tout en augmentant la valeur ajoutée de ces derniers et des polymères utilisés. C'est dans ce contexte, que l'entreprise Acta Mobilier (Monéteau, France) cherche à valoriser ses déchets de panneaux de fibres de densité moyenne (MDF). Ces sciures sont présentes en grandes quantités (environ 1 m<sup>3</sup> par jour). La volonté de l'entreprise est donc de pouvoir recycler ses sciures de MDF en utilisant l'impression 3D pour la création de nouveaux produits à haute valeur ajoutée. Afin de proposer un produit le plus vertueux possible, une étape de dépollution des fibres de MDF peut être envisagée. Cette dépollution des fibres ainsi que l'imprimabilité du composite sont quelques-uns des nombreux défis qui restent encore à relever avant l'industrialisation de ces nouveaux produits.

### Matériels et Méthodes

#### *Fibres de MDF utilisées*

Les fibres de MDF utilisées sont les déchets d'usinage récupérés chez Acta Mobilier. Afin de ne pas boucher la buse de l'imprimante 3D (diamètre de 0.8 mm) les sciures ont au préalable été tamisées à 300 µm. Cette fraction correspond à plus de 90% de la masse totale de déchet MDF. Par ailleurs, une analyse granulométrique (Malvern 3000, Malvern Panalytical) a permis de montrer que leur taille moyenne (D50) est de 100 µm. Les sciures ont une humidité relative de 5%.

#### *Dépollution des sciures de MDF*

Afin de retirer la résine urée-formaldéhyde des sciures de MDF, un pré-traitement des sciures a été mis en place. Dans un cristallisateur métallique une quantité d'environ 350g de sciures de

MDF tamisée a été introduite, recouverte à hauteur d'eau distillée. L'ensemble a ensuite été placé dans un autoclave à 121°C pendant 15 minutes. Les sciures ont par la suite été filtrées deux fois sous-vide à l'aide d'un filtre Büchner avec un rinçage entre les deux filtrations. Avant d'être utilisées dans le composite, elles ont au préalable été préséchées à 60°C pendant 3 jours puis séchées sous-vide à 103°C pendant 24h dans une étuve.

#### *Fabrication des composites*

A l'aide d'une extrudeuse bi-vis (Thermo Scientific, PTW24), différents lots de composites ont été fabriqués en mélangeant le MDF à l'acide polylactique (PLA). Le PLA est amené dans l'extrudeuse par un débitmètre volumique calibré alors que les fibres de MDF sont amenées par un débitmètre massique (également calibré au préalable). Le PLA utilisé est le PLE005 de chez NaturePlast (Ifs, France) avec une densité de 1,25 et un indice de fluidité à chaud de 23 g/10 min (donnée fournisseur). Le profil de température de l'extrudeuse est constant sur toute sa longueur et de 170°C pour l'expérience de référence avec du PLA vierge contre 160°C pour produire un composite PLA / MDF (avec une teneur de 20% en masse de MDF). Dans le but de rendre le procédé le plus simple industriellement, l'ensemble des intrants n'ont pas été séchés au préalable. Différents lots ont été réalisés parmi lesquels :

- Un lot CB constitué de 20% en masse de fibres de MDF et 80% de PLA
- Un lot CC0 constitué de 20% en masse de fibres de MDF dépolluées et 80% de PLA

#### *Mesure de l'indice de fluidité à chaud (Melt Flow Index – MFI)*

Les mesures de l'indice de fluidité à chaud ont été réalisées à l'aide d'un testeur de fluidité polyvalent (CEAST MF20, Instron). La précharge utilisée est de 2.16 kg et la température de 180°C. Chaque mesure a été répétée huit fois. Les graphiques obtenus ont été réalisés sous R (R Core Team 2021).

#### *Calorimétrie Différentielle à balayage (DSC)*

La DSC est une méthode d'analyse thermique consistant à mesurer la différence de flux de chaleur entre un échantillon et une référence. L'échantillon est placé dans une capsule en aluminium et la référence consiste en une capsule vide. La variation du flux de chaleur est enregistrée en fonction du temps et de la température. Par la mesure de la différence de flux de chaleur, il est alors possible d'observer différents phénomènes physiques et de déterminer plusieurs grandeurs (Menczel et Prime 2009) dont la température de fusion ( $T_f$ ). Cette température est un point de départ pour déterminer la température d'extrusion du matériau sur l'imprimante 3D.

#### *Impression 3D*

L'objectif principal de ce projet, est l'impression 3D du matériau composite obtenu. Le procédé choisi pour l'impression 3D est l'extrusion de matière et plus spécifiquement le *Fused Granular Fabrication* (FGF, permettant l'extrusion de pellets). Pour cela, une imprimante Tumaker NX Pro Pellet a été utilisée. Différents paramètres ont fait l'objet d'une étude et d'une optimisation. Les paramètres fixes sont résumés dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Principaux paramètres fixes sur l'imprimante 3D

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
Vitesse d'impression	45 mm/s
Température d'impression	185 – 210 °C (selon la formulation)
Température du plateau	50 °C
Facteur de correction de débit	1,4 – 2,8 (selon la formulation)
Diamètre de la buse	0,8 mm

## Mesures de résiliences

La résilience des différents composites a été évaluée selon la norme NF EN ISO 179-1 avec la méthode d'essais de mouton de Charpy. Pour cela, un ensemble de 10 éprouvettes par formulations de composite ont été imprimées. Les éprouvettes ont des dimensions de 80x10x4 mm puis entaillées sur une profondeur de  $2,0 \pm 0,2$  mm avec un angle de  $45 \pm 1^\circ$  et un rayon de 0,25 mm comme indiqué sur la Fig. 1 (entaillures de type A).



Fig. 1 : Plan et photographie d'une éprouvette de choc avant d'être cassée

Les éprouvettes ont été imprimées une à une afin d'obtenir un minimum de défaut d'impression. Le taux de remplissage des pièces est de 100 % (le taux de remplissage est un paramètre géométrique défini par l'utilisateur), avec des couches imprimées à  $45^\circ/-45^\circ$ . La dimension de chaque éprouvette a été mesurée, afin de recalculer la résilience réelle à partir de l'énergie de rupture et la surface réelle de l'éprouvette.

## Résultats et Discussion

Les propriétés du composite obtenu dépendent grandement des intrants. Du fait de la variabilité de la sciure de MDF, c'est pourquoi, il est important de mettre en place des outils performants afin de pouvoir corréliser les propriétés initiales de la sciure et du PLA à celles du matériau composite final. L'objectif final est donc d'être en capacité de pouvoir imprimer les différentes formulations.

### Mesures de MFI

La mesure du MFI permet d'obtenir une première image de son comportement à l'état fondu à des taux de cisaillement faibles. Les échantillons testés sont le PLA pur, le lot PLA / MDF et le lot PLA / MDF dépollué. Les résultats sont présentés dans la Fig. 2.

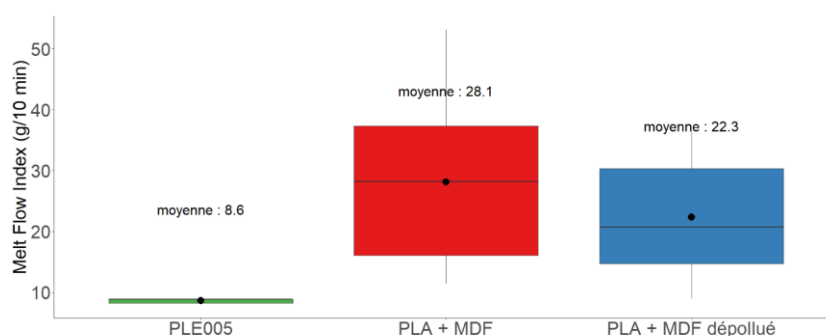


Fig. 2 : Mesures de MFI obtenues pour les différents lots

Le PLA à  $180^\circ\text{C}$  présente un MFI qui est en adéquation avec ce qui est couramment obtenu pour la fabrication additive (environ 10 g/10min) comme recommandé (Wang 2017). L'ajout de MDF dans le PLA entraîne alors une augmentation importante de ce dernier (facteur 3). De plus, la dispersion des valeurs augmente de manière très importante. La principale hypothèse permettant d'expliquer cette augmentation des valeurs est une dégradation du PLA par hydrolyse lors du procédé d'extrusion. Cela engendre des chaînes de polymères de plus petites tailles qui voient donc leurs mobilités accrues. Le MFI augmente également lorsque les fibres

sont dépolluées (facteur 2,5) mais de manière légèrement moins importante. Cela pourrait être due à une meilleure cohésion entre les fibres de MDF dépolluées et le PLA. En effet, pour le composite CB, les interactions ont lieu entre des fibres encollées et du PLA tandis que dans le cadre du composite CC0, les interactions sont entre des fibres où il n'y a plus de colle (ou très peu) et le PLA. Pour l'impression 3D, cela participe à expliquer les différences entre les paramètres d'impressions.

#### Détermination de la température de fusion par DSC

L'ajout de 20 m.% de fibres de MDF dans le PLA résulte en une baisse plus ou moins importante de la température de fusion. Sur les thermogrammes (Fig. 3), seul le PLA vierge ne présente pas de double pic de fusion. Le rajout des fibres de MDF entraîne de manière systématique l'apparition d'un double pic. A cause de la présence des sciures, les parties cristallines du PLA sont « perturbées » et ne se recristallisent pas de la même manière. Une partie des cristaux commence à fondre plus vite, entraînant l'apparition d'un premier pic de fusion (Praprudivongs et Sombatsompop 2012).

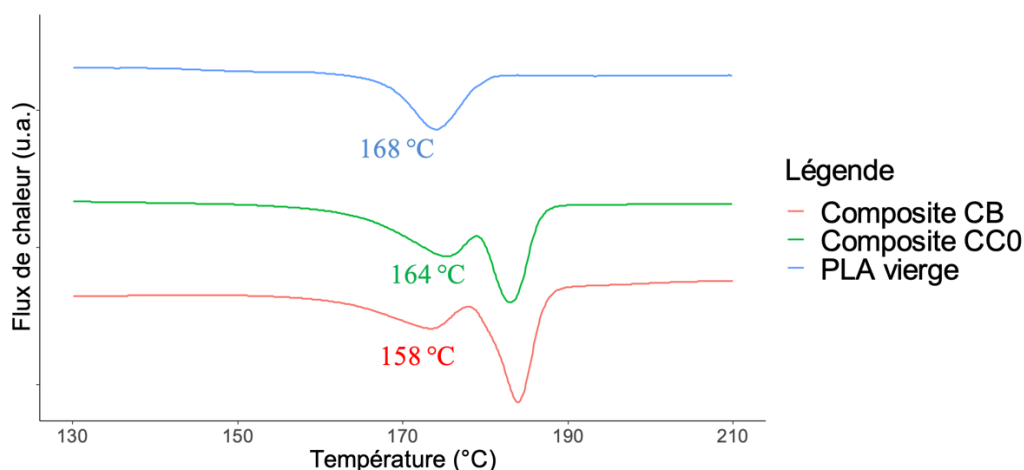


Fig. 3 : Thermogrammes des différents composites entre 130 et 210 °C

#### Impression 3D

La mise au point du procédé d'impression 3D par le procédé de *Fused Granular Fabrication* (FGF), est une étape importante qui a demandé de nombreux ajustements. Les matériaux composites obtenus n'étant pas des pellets commerciaux, il a été nécessaire de déterminer l'ensemble des paramètres permettant une impression réussie. L'impression est considérée réussie lorsque la pièce est imprimée jusqu'au bout de processus sans qu'il n'y ait eu de problèmes liés à l'imprimabilité. Cela ne garantit pas que la pièce soit sans défauts esthétiques. A partir des paramètres obtenus pour le PLA vierge (température 210°C, et correction de débit à 1,4), l'enjeu est donc d'ajuster ces paramètres pour permettre l'impression des composites à base de MDF. Pour chacun des deux lots de composites, il convient d'ajuster en premier lieu la température d'extrusion. Une fois que le matériau peut être extrudé au travers de la tête d'impression, le débit de matière est ajusté, afin que chacune des couches soit pleines et qu'il n'y est pas de manque de matière. Après plusieurs ajustements, l'impression des différents composites formulés est possible (Fig. 4).



Fig. 4 : Motif de branche de cerisier imprimé en 3D (à gauche avec le composite PLA + MDF et à droite avec le composite PLA + MDF dépollué)

D'un point de vue esthétique, la plus grosse différence est la couleur du matériau après impression. La dépollution des fibres entraîne une couleur légèrement plus foncée et plus mat du matériau. Le composite CB est très brillant avec une couleur marron clair.

#### *Essais de résilience*

Les valeurs de résilience obtenues (Tab. 2), sont beaucoup plus dispersées pour le composite brut et le PLA que pour le composite avec les fibres dépolluées. Le composite CC0 avec les fibres dépolluées a une résilience nettement supérieure (+ 31 % par rapport au composite CB). Cette augmentation plus importante peut être attribuée à une meilleure cohésion entre les fibres de MDF et le PLA. Le PLA étant directement en contact avec les fibres de bois et non plus avec la résine urée-formaldéhyde, il peut former des liaisons faibles (Van der Waals, hydrogène) avec les fibres de MDF. Les efforts encaissés seraient ainsi mieux dispersés au sein du composite.

Tab. 2 : Résilience (n=10) des différents composites formulés et imprimés en 3D

Composite	Résilience (kJ/m <sup>2</sup> )
PLA vierge	2,21 ± 0,81
Composite CB	2,14 ± 0,85
Composite CC0	2,81 ± 0,45

#### **Conclusion**

Nous avons montré qu'il est possible d'obtenir un composite doté de caractéristiques satisfaisantes pour l'impression 3D à partir de déchets d'usinage de MDF. Après plusieurs ajustements et malgré un comportement différent de ce qui est généralement fait pour l'impression 3D, le procédé de FGF donne satisfaction et permet d'obtenir de bons résultats d'impression. Les propriétés mécaniques, et notamment la résilience des matériaux a été mesurée avec succès et permet de mettre en évidence l'intérêt de la dépollution des fibres de MDF. Dans l'objectif d'améliorer encore ces différentes propriétés, l'ajout d'un compatibilisant combiné à la dépollution des fibres pourrait être une piste très prometteuse. L'ajout de compatibilisants pourrait également conférer de nouvelles propriétés au matériau composite, tel qu'une meilleure résistance au vieillissement.

#### **Remerciements**

Les travaux présentés ci-dessus sont réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE avec l'entreprise Acta Mobilier (Monéteau, Yonne). Pour la mise au point de l'impression 3D FGF, l'aide apportée par Benjamin Bonnot (Directeur de Scan Reality, Dinozé) a été significative.

## Références

FAO (2022) FAOSTAT. [en ligne]. [Consulté le 27 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/FO>

Menczel JD, Prime RB (éd.) (2009) Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications. Hoboken, N.J : John Wiley. ISBN 978-0-471-76917-0. QD139.P6 T445 2009

Pandey S. (2022) Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. SN Applied Sciences. Vol. n°4, pp. 1-8.

Praprudivongs C, Sombatsompop N (2012) Roles and evidence of wood flour as an antibacterial promoter for triclosan-filled poly(lactic acid). Composites Part B: Engineering. Vol. n°43, pp. 2730-2737.

Wang SS (2017) Can the melt flow index be used to predict the success of fused deposition modelling of commercial poly(lactic acid) filaments into 3D printed materials? Plastics Rubber and composites. Vol. n°47, pp. 9-16.



## Former les charpentiers et les charpentières de bois vert. Quels enjeux, quelles possibilités ?

BRIHIEZ Joseph<sup>1,2</sup>, LEFEVRE Marc<sup>2</sup>, RAMBAUD Paul<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Eco-anthropologie UMR 7206, MNHN, Paris

<sup>2</sup>Association Iron Rabbits, Nivillac

<sup>3</sup>SARL De l'arbre à la maison, Nivillac

[joseph.brihiez@mnhn.fr](mailto:joseph.brihiez@mnhn.fr)

*Note préalable* : Notre poster n'est pas un compte rendu d'une recherche quantitative bien qu'il s'y rapporte indirectement, le présent résumé n'emprunte pas tout à fait la forme de plan préconisé.

**Mots clefs** : Bois vert ; Formation ; Artisan-chercheur ; Savoir & savoir-faire

### Introduction

Depuis 2019, le chantier des charpentes de Notre-Dame a eu pour effet de propulser la demande en matière de formation au métier de charpentier/charpentière. Il émane de cette situation la manifestation d'une volonté d'essor pour un ensemble de savoir-faire manuels considérant qu'un nombre d'avantages découlent de ces méthodes jugées plus respectueuses du matériau bois et plus valorisantes pour l'artisan. Cet ensemble fonctionnel de savoir-faire qui englobent l'équarrissage à la hache adopte désormais de manière très répandue la désignation de « charpente de bois vert ».

Des efforts progressifs de formalisation et de normalisation des enseignements sont engagés par différents acteurs et aboutissent à ce que cet hiver 2024 s'ouvre une formation expérimentale de plusieurs mois intitulée « De l'arbre à l'ouvrage : devenir *charpentier.es bois vert* » (nous soulignons). Ce poster se présente sous la forme d'un retour d'expérience de plusieurs formations et projets que notre association a menés afin d'œuvrer pour sa part à l'instauration des règles de bonnes pratiques.

### Contexte

Entre 2022 et 2023, la reconstruction rapide de la charpente de Notre Dame « à l'identique » a nécessité la mobilisation d'une importante quantité de charpentiers capables de façonner à la hache les pièces de charpente à partir de troncs d'arbre ébranchés appelés « grumes ».

Or, en France, les praticiens compétents en équarrissage à la hache ne se trouvent pas en nombre suffisant pour répondre à cette demande pressante. S'impose alors un besoin soudain de formation à cette technique manuelle et il faut dégager la capacité d'y subvenir impérativement. Dans cette perspective, un « cahier des charges pour la formation à la taille mixte et manuelle du bois vert » fut édité afin d'accompagner les premières expériences de formation.

### Méthode

Nous avons concouru à la constitution des équipes de formation et à la dispense des enseignements par notre participation active. Celle-ci s'est effectuée sous la forme de la conduite d'un premier stage de formation à destination des personnels des Ateliers Perrault, tout en disposant d'une très importante marge d'initiative dans la conception du dispositif d'apprentissage adopté. Nous avons lancé ensuite trois stages de formation de notre cru qui ont

permis à notre association de poursuivre cette expérience d'enseignement, y mêlant équarrissage à la hache et techniques de mise sur ligne, piquage et taillage d'assemblages en vue de la construction d'ouvrages de charpente en bois vert. Chacune de ces étapes sera détaillée dans le poster.

Il s'avère que depuis que nous nous consacrons professionnellement à ce type de formations, nous nous sommes trouvés confrontés à des difficultés d'appréciation qui interviennent sur les conditions de mise en pratique du bois vert en charpente. Dans un souci de parfaire notre maîtrise, ce qui conditionne à la fois la fiabilité des travaux réalisés, et, par voie de conséquence, la fiabilité de nos contenus de formation, nous avons initié un travail de collaboration avec différents chercheurs en science du bois pour tenter d'apporter des éclairages à des préoccupations qui sont survenues dans le cours de nos activités de charpentier de bois vert. (Brihiez et al 2023).

### **Perspectives**

Au-delà des raisons immédiates qui nous ont conduits à cette démarche, nous nous demandons ce que peuvent constituer les potentialités impliquées par un recours à cette interaction entre les milieux artisanaux et les milieux scientifiques dans un souci d'amélioration des savoir-faire techniques et manuels.

C'est en s'appuyant sur des enquêtes de terrain ethnographiques, sur les expériences professionnelles des différents acteurs concernés, sur une expérience propre de transmission de l'équarrissage, ainsi qu'à l'aune de cette première étape expérimentale nous associant aux travaux des scientifiques, que nous proposons d'animer un dialogue autour de ce poster au travers duquel nous pourrions tenter d'aller plus loin dans la mixité des savoirs respectives.

### **Références**

Brihiez J, Lefevre M, Rambaud P (2023) La maquette des Halles de Villeréal ; des perspectives d'artisans pour contribuer à l'étude scientifique d'une construction en bois vert, Actes des 12<sup>èmes</sup> Journées Annuelles du GDR3544 Sciences du bois, 22-24.11.23, Limoges, pp. 186-187.

## Etude de la formulation d'un vernis à bois à base de colophane de Pin maritime (*Pinus pinaster*)

GOUTY Quentin, CHARRIER Bertrand

Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS  
Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux  
(IPREM-UMR 5254)  
403 rue de Saint Pierre, 40000 Mont de Marsan, France  
[quentin.gouty@univ-pau.fr](mailto:quentin.gouty@univ-pau.fr)

**Mots clés :** Pin maritime ; colophane ; chlorophylle ; vernis à bois ; photo-réticulation

### Introduction

Les vernis sont des matériaux polymères majoritairement synthétisés à partir de matières premières fossiles issues du pétrole et de ses dérivés (résines époxy, polyuréthanes, mélamine-formol...). L'accélération du changement climatique et la croissance de la demande sociétale pour des produits et procédés plus responsables mobilisent la communauté scientifique internationale vers une chimie plus respectueuse de l'environnement, notamment dans le domaine des résines (Fig. 1).

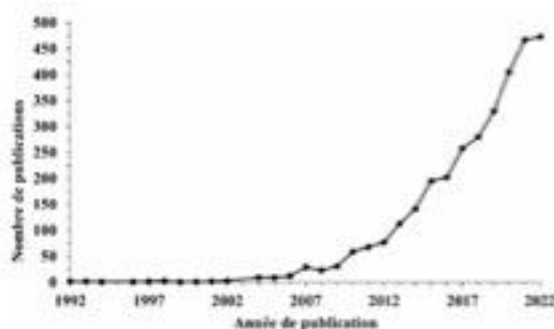


Fig. 1 : Évolution du nombre de publications dont le titre contient les mots clés 'biosourced' ou 'biobased' (ainsi que leurs dérivés orthographiques ('bio-based', 'bio-sourced' etc.) et 'resin').

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans cette démarche, pour développer des vernis à bois à partir de ressources renouvelables, et plus particulièrement à partir d'un produit local et naturel issu des pins maritimes (*Pinus pinaster*).

*Pinus Pinaster*, est une espèce de conifère qui évolue naturellement dans les régions occidentales de l'Europe, plus particulièrement en France, où elle représente 10% des terres forestières. Le pin maritime possède une oléorésine très riche de laquelle, on peut obtenir après distillation un résidu solide appelé colophane. L'extraction de l'oléorésine de l'arbre se fait par gemmage, une pratique non destructive sensiblement proche de la saignée de l'hévéa pour l'extraction de latex.

L'objectif principal de cette thèse est le développement et la caractérisation de vernis à bois à base de colophane conçues pour concurrencer, en termes de performances (résistance mécanique, chimique, thermique, à l'humidité, UV...) et séchage (UV et/ou air), les vernis traditionnels, tout en ayant un impact moindre sur l'environnement. Les travaux menés lors des 2 premières années ont permis de développer une formulation de vernis dont les capacités de séchages à l'UV s'approchent progressivement de celle d'un vernis classique et dont la partie biosourcée approche les 99%. En effet, les travaux se sont axés autour d'un système photochimique de réticulation. Des études ont montré qu'il est possible d'obtenir un tel système

à l'aide de photo-sensibilisant biosourcés (la chlorophylle). Cependant, la contrepartie de ce système est la nécessité d'utiliser un co-initiateur efficace (ici amine substituée), et souvent non biosourcé (Shanmugam et al., 2015). L'étude ci-après présente donc cette formulation, de sa conception à sa caractérisation.

## Matériels et méthodes

### *Extraction de la chlorophylle*

La chlorophylle, nécessaire au système de séchage photochimique UV a été extraite directement d'une plante disponible localement (Grande ortie ou *Urtica Doina*). L'extraction a été réalisée par macération pendant 48h, dans de l'éthanol absolu, des feuilles et tiges préalablement découpées. Après une étape d'évaporation à l'aide d'un évaporateur rotatif du solvant, le résidu obtenu est dissout dans de l'éther de pétrole puis lavée à l'eau salée. Après décantation et évaporation rotative, la masse vert sombre a été dissoute dans de l'huile de lin brute et conservée à l'abri de la lumière au congélateur à -15°C. Les quantités de chlorophylle a, chlorophylle b, caroténoïdes et xanthophylles ont été déterminées par spectrométrie UV-VIS à l'aide d'un spectromètre Shimadzu UV-26001 (Lichtenthaler et Buschmann 2001). La solution obtenue contenant les différents composés susmentionnés, et autres propres à la plante, est nommée extrait de chlorophylle.

### *Ester de colophane*

L'ester de colophane a été synthétisé selon la méthode décrite par Mardiah et al. (2023) : la colophane brute (fournie par la société Holiste, Landes) broyée a été directement mélangée avec du glycérol et 1% en masse d'oxyde de zinc (fournis respectivement par la société Fisher Scientific et Sigma-Aldrich). La proportion molaire colophane/glycérol a été ajustée en fonction du degré d'estérification désiré du glycérol par les acides résiniques de la colophane. Le mélange a été chauffé à 260°C sous atmosphère inerte (azote) pendant 6h. La caractérisation des produits de réaction étant difficile en GC-MS (isomérisation acido-basique), le suivi de la réaction d'estérification a été mesuré par mesure de l'indice d'acide.

### *Formulation des vernis et application sur bois*

La formulation de vernis a été réalisée comme suit : broyage fin de l'ester de colophane pour faciliter sa dissolution dans de l'huile de lin à 150°C. Après un refroidissement à 40°C, l'extrait de chlorophylle a été ajouté puis la pyridine (le co-initiateur) à température ambiante. L'intérêt d'ajouter ces deux éléments à 50°C puis à température ambiante est d'éviter la dégradation thermique de la chlorophylle et l'évaporation de la pyridine.

Des planches en 75×35×5 mm de bois préalablement séché de pin maritime ont été découpées, puis poncées au papier à grain de 120µm puis 180µm. Après essuyage pour enlever les poussières de bois, les couches de vernis ont été appliquées au pinceau avec un grammage contrôlé de 60g/m<sup>2</sup>/couche. Deux couches ont été appliquées successivement.

### *Caractérisations*

La mesure du temps de séchage a été réalisée suivant la norme ASTM D1640/D1640M-14 (2022), procédure 7.3.1. Des fibres individuelles issues d'une masse de coton absorbant ont été séparées. À intervalles réguliers, plusieurs fibres de coton ont été laissées tombées d'une hauteur de 25 mm sur une section marquée du film. Le film est considéré sec lorsque les fibres de coton peuvent être enlevées en soufflant légèrement sur la surface du film.

L'appareil de séchage UV est un caisson isolé en bois réalisé dans le cadre des travaux de thèse de M. Francès (2020). La lampe UV utilisée est une lampe dopée au fer UV-technik UVH-lamp typ F 250W, d'une plage de longueur d'onde d'émission optimale de 350 à 400nm.

Un test d'adhésion du film de vernis a été réalisé selon la norme NF EN ISO 2409. Un couteau à 4 lames parallèles a été utilisé pour griffer et réaliser un quadrillage sur le film. Un brossage est appliqué sur le quadrillage puis un ruban adhésif est appliqué puis retiré. Visuellement à l'aide d'une loupe, l'adhérence du vernis est catégorisée de 0 à 5 en fonction de l'état de dégradation. La note de 0 indique qu'aucune dégradation n'est observée.

L'épaisseur a été mesurée à l'aide d'un appareil de mesure ultrasonique (Positector 2000) certifié ISO 9001, tandis que la brillance a été mesurée avec un brillancemètre (Byk-Gardner micro-tri-gloss), selon la norme NF EN ISO 2813.

## Résultats et discussions

Le développement d'une première formulation est basé sur la mise en place d'un plan d'expérience, appuyé par une analyse de variance (ANOVA) (Tab. 1, Fig. 2)).

Tab. 1 : Plan d'expérience initial et résultats en termes de temps de séchage.

Référence	A	B	C	D	E	F	G	H
Ratio Colophane/Huile (R)	50/50				15/85			
Degré d'estérification de la colophane (D)	3		1		3		1	
%m extrait de chlorophylle (ortie) + pyridine (C)	4	1	4	1	4	1	4	1
<b>Temps de séchage moyen (min, couche 1)</b>	<b>33</b>	<b>18</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>38</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>25</b>

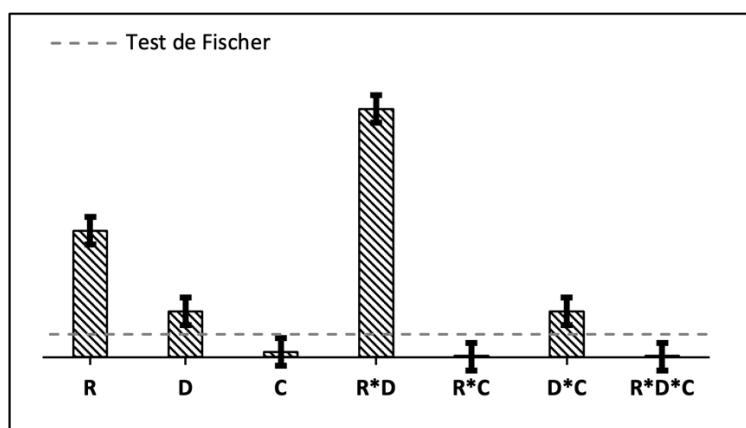


Fig. 2 : Diagramme de Pareto du plan d'expérience initial

Les résultats indiquent une corrélation directe entre la teneur d'ester de colophane et la vitesse de séchage du vernis. Globalement, une teneur plus forte en huile ralentit la vitesse de séchage. Ce résultat est expliqué par le fait que les doubles liaisons présentes dans la molécule de colophane sont conjuguées à contrario de celles présentes dans les triglycérides de l'huile de lin. Ces doubles liaisons conjuguées sont plus réactives vis-à-vis des réactions radicalaires et donc du procédé de réticulation (Zovi 2019, Orlova et al 2020). De plus, le degré d'estérification est également significatif. De la même manière, plus le degré d'estérification est grand, plus le nombre de sites réactifs pour la réticulation (les doubles liaisons conjuguées) est grand. Le caractère significatif de l'interaction entre ces deux facteurs susmentionnés (R\*D) renforce également ces interprétations.

Il est intéressant de remarquer que l'interaction entre la teneur de chlorophylle/pyridine et le degré d'estérification est significatif (D\*C) tandis que la teneur de chlorophylle/pyridine seule

ne l'est pas. En effet, une colophane de degré 1 ne présente qu'un site réactif, contre 3 pour la colophane de degré 3. Lors de la réticulation, une fois que la colophane de degré 1 a réagi, il ne peut plus y avoir de réaction supplémentaire et donc la propagation de la réticulation s'arrête. Ce serait au tour des triglycérides (moins réactifs) de suivre la réaction. De ce fait, l'augmentation du nombre de radicaux initiaux générés par la chlorophylle n'influe que si la réaction peut se propager, expliquant ainsi le caractère significatif de cette interaction.

Enfin, l'influence négative de cette interaction indique qu'une interaction chimique, encore mal comprise subsiste, et est probablement due à la présence d'autres molécules naturelles au sein de l'extrait de chlorophylle et issues de la plante.

Les tests d'adhérences n'ont pas pu permettre d'obtenir des informations supplémentaires puisque tous les vernis avaient été catégorisés entre 1 et 2/5. Les vernis de catégorie 2 correspondent aux vernis ayant une colophane de degré d'estérification 1, ce qui est attendu puisque qu'avec un degré tel, la réticulation n'est pas aussi importante et donc l'adhérence est sensiblement plus faible.

Les mesures de l'épaisseur ont permis de confirmer une inhomogénéité sur tous les vernis (Fig. 3, écart-type particulièrement grand), dont l'aspect granuleux pouvait être observé à l'œil avec une lumière et un angle éclairé adéquat (Fig. 4 carré rouge). Cet aspect est causé par la précipitation progressive de l'ester de colophane pendant la réticulation qui ne semble pas miscible avec le milieu polymérique naissant.

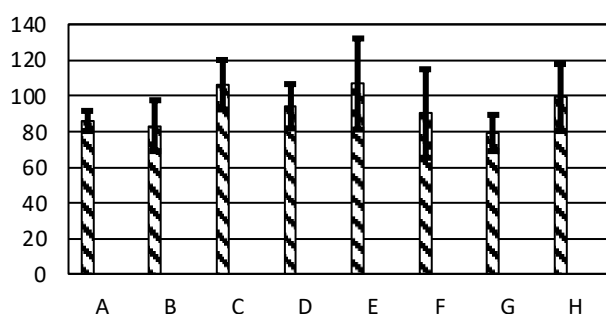


Fig. 3 : Histogramme des mesures d'épaisseur des films de vernis par ultrasons

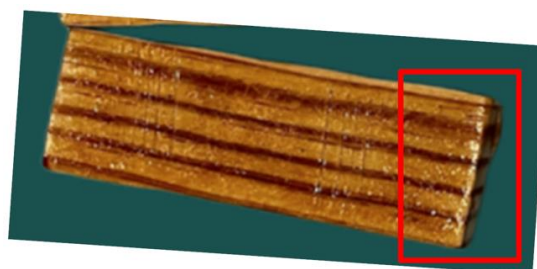


Fig. 4 : Photographie du vernis appliqué de l'essai D du plan d'expérience (et ayant subi un test d'adhérence en dupliques) – Carré rouge : zone visible de l'inhomogénéité du vernis

## Conclusion et perspectives

Ces résultats sont encourageants puisqu'une formule a pu être développée avec un séchage photochimique amélioré (20min au lieu d'1h30 sur les précédents travaux) et presque à 99% biosourcé. Cependant, les vernis industriels peuvent sécher en moins d'une minute. De plus, ces nouveaux vernis présentent des défauts d'homogénéités, et des tests supplémentaires de vieillissement doivent être réalisés pour observer leur résistance aux aléas climatiques extérieurs (humidité et UV).

## Remerciements

Jeremy MEHATS, Eduardo ROBLES, Alix MARTINEZ, Tristan DUPUY, Alexandre SANCHEZ, le Conseil Départemental des Landes. Ces travaux ont été financés par le Conseil Départemental des Landes (CD40).

## Références

Shanmugam S, Xu JT, Boyer C (2015) Utilizing the electron transfer mechanism of chlorophyll a under light for controlled radical polymerization. *Chem. Sci.* **6**, 1341–1349.

Lichtenthaler HK, Buschmann C (2001) Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, F4.3.1-F4.3.8.

Mardiah M, Samadhi TW, Wulandari W, Aqsha A, Situmorang YA, Indarto A (2023), Recent Progress on Catalytic of Rosin Esterification Using Different Agents of Reactant. *AgriEngineering*, 5(4), 2155-2169

Francès M (2020) Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale. Thèse de doctorat. Pau. Zovi O (2009) Fonctionnalisation et photopolymérisation de l'huile de lin en vue de l'élaboration de nouveaux matériaux sans émissions de composés organiques volatiles (COV), Thèse de doctorat, INSA de Rouen,

Orlova Y, Harmon RE, Broadbelt LJ, Iedema PD (2021) Review of the Kinetics and Simulations of Linseed Oil Autoxidation. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106041.

## **RECOMPOSE : Valorisation de déchets de bois de menuiseries en matériaux biocomposites pour l'habitat**

LE COURBE Arnaud<sup>1,2</sup>, CARAYON Lionel<sup>1</sup>, CANDELIER Kévin<sup>3,4</sup>,  
VIRETTO Amandine<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Menuiserie CARAYON, Béziers, France

<sup>2</sup>Master Sciences du bois, Faculté des sciences, Univ Montpellier, Montpellier, France

<sup>3</sup>CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

<sup>4</sup>BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

[kevin.candelier@cirad.fr](mailto:kevin.candelier@cirad.fr)

**Mots-clés :** Matériaux biocomposites ; Déchets de bois ; Résine Biosourcée ; Propriétés mécaniques ; Ignifugation et Durabilité biologique.

### **Contexte et objectifs**

La menuiserie CARAYON produit des menuiseries d'intérieur et d'extérieur en bois. Sa production en croissance engendre une augmentation importante des connexes, principalement sous forme de sciures et de copeaux de bois. Le projet RECOMPOSE a pour but de valoriser cette biomasse résiduelle, en développant un matériau composite entièrement biosourcé à partir de ces connexes de bois issus de la ligne de production. Ce nouveau matériau sera destiné à la fabrication de menuiseries d'intérieur innovantes, permettant à l'entreprise d'élargir leurs activités et leur gamme de produits. Il est développé en collaboration entre la menuiserie CARAYON et l'unité de recherche BioWooEB (CIRAD).

Ce projet s'inscrit dans une démarche intégrée ; il permet à l'entreprise de réduire ses émissions en CO<sub>2</sub> et autres gaz à effets de serre, ainsi que de réduire la pression sur l'exploitation forestière en limitant la consommation de bois massif par substitution grâce à ces matériaux composites issus de ressources résiduelles, auxquelles une certaine valeur ajoutée est conférée. L'intégration de ces nouveaux matériaux composites dans la chaîne de production de l'entreprise, suivant une approche de circularité, reste compétitive et cohérente avec le contexte socio-économique et propose une réponse intéressante aux enjeux environnementaux actuels.

### **Matériels et méthodes**

#### *Caractérisations des biomasses*

Les biomasses résiduelles (copeaux, sciures de bois et co-produit agricole issu d'une biomasse locale) ont été caractérisées du point de vue de leur composition chimique (taux de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, teneurs en composés extractibles et en éléments minéraux), de leur densité et de leur morphologie (taille et forme). Ces étapes préliminaires sont essentielles pour optimiser la formulation et le procédé de fabrication et d'anticiper les propriétés technologiques des matériaux biocomposites développés par la suite.

#### *Formulations et Mise en Forme*

Les formulations sont réalisées à partir des biomasses résiduelles mises en mélange mécaniquement avec une matrice polymérique biosourcée commerciale. Pour certaines formulations, un retardateur de flamme (RF) a été ajouté au mélange. La mise en forme se fait à l'aide d'une presse hydraulique chauffante 100T (MIB, France) en utilisant un système de moule/contre-moule. La densité visée de 800 kg/m<sup>3</sup> des composites est contrôlée par la masse



du mélange introduite dans le moule. Différents paramètres comme le ratio fibres/matrice, le ratio entre les différentes fibres, le taux de RF ainsi que la température et la durée de mise en œuvre ont également été évalués.

### *Caractérisations des matériaux composites développés*

L'objectif de ce projet est de concevoir des matériaux composites ayant des propriétés technologiques et d'usages équivalentes à celles des menuiseries en bois lamellé-collé actuellement présentes sur le marché.

Les différents matériaux biocomposites développés sont caractérisés du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques (densité, porosité et gonflement), mécaniques (propriétés en flexion, NF EN 310, 1993), thermiques (conductivité thermique), de leur comportement au feu (cône calorimètre, NF ISO 5660-1 2015) et de leur durabilité vis-à-vis des champignons (1 pourriture blanche et 1 pourriture brune, EN 113-2 2020) et des termites souterrains (*Reticulitermes flavipes*, EN 117 2023). L'ensemble de ces essais de caractérisation sont également réalisés sur des échantillons de menuiseries en bois lamellé-collé fabriqués par la menuiserie CARAYON, afin de comparer les caractéristiques des nouveaux matériaux avec celles d'un matériau commercial de référence.

## Résultats et discussion

Des matériaux composites d'une densité d'environ 800 kg/m<sup>3</sup> ont été réalisées avec 20 wt.% de colle biosourcée en faisant varier notamment le ratio entre les différentes fibres (Fig. 1).



Fig. 1 : Image de surface des composites fabriqués, en fonction de leur proportion en copeaux et sciures de bois

Des essais mécaniques, réalisés en flexion 3 points (NF EN 310 1993), ont été menés en triplicata sur des éprouvettes (20 x 2.5 x 2.5 cm) découpés dans les matériaux biocomposites développés, ainsi que sur des échantillons de bois lamellé-collé, utilisés comme référence. Les valeurs de contrainte à rupture en flexion statique sont données dans le Tableau 1. Les résultats issus d'une étude précédente (Le Courbe et al 2023) ont démontré des valeurs de contrainte à rupture plutôt faibles, situés autour 2 – 6 MPa pour des échantillons d'une densité plus faible autour de 500 – 600 kg/m<sup>3</sup>. Dans ce travail, l'optimisation des formulations et du procédé de fabrication ont permis d'obtenir des densités plus élevées pour nos matériaux et ainsi d'atteindre des contraintes à rupture d'environ 10 MPa. Les valeurs obtenues sont encore inférieures à celles du matériau de référence en lamellé collé ( $\sigma_{ref} = 64,7 \pm 21,3$  MPa) mais permettent tout de même de répondre aux sollicitations mécaniques pour l'application visée en tant que matériau de menuiseries intérieures.

L'évaluation du comportement au feu des biocomposites (NF ISO 5660-1, 2015) a été réalisée sur des échantillons de 10 x 10 x 2,5 cm<sup>3</sup>, en duplicata. Les principales caractéristiques sont données dans le Tableau 1. Les courbes de débit calorifique obtenues, sont typiques de celles caractéristiques des matériaux thermiquement épais et charbonnants avec un second pic apparaissant à la fin de l'essai (Schartel et Hull 2007). Ce second pic est, en réalité, un artéfact lié au fait que le matériau est isolé en face arrière ; lorsque le front de chaleur atteint le bas de l'échantillon, la chaleur ne peut être évacuée, et alors la température augmente, et la vitesse de

pyrolyse s'accélère. Les différentes formulations présentent des valeurs caractéristiques globalement assez proches, bien que certaines différences puissent être observées. La formulation 100Copeaux a le temps d'ignition (TTI) le plus élevé ( $TTI_{100Copeau} = 42$  s), alors que la formulation 100Sciures a le TTI le plus faible ( $TTI_{100Sciure} = 21$  s). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les particules de sciures de petite taille, sont individuellement thermiquement fines et que les différentes fractions (sciures, copeaux et résidus agricoles) ont un comportement intrinsèque différent (stabilité thermique, énergie libérée, taux de résidu...). Les valeurs de pic de débit calorifique (pHRR) les plus élevées correspondent aux formulations 100Copeaux et 100Sciures ( $pHRR_{100Copeaux} = 191 \pm 9$  kW/m<sup>2</sup> et  $pHRR_{100Sciures} = 199 \pm 13$  kW/m<sup>2</sup>), alors que les deux formulations contenant les plus forts taux de résidus agricoles présentent les plus faibles pHRR ( $pHRR_{33Cop./33Sci./33Agr.} = 149 \pm 2$  kW/m<sup>2</sup> et  $pHRR_{75Cop./6Sci./19Agr.} = 144 \pm 7$  kW/m<sup>2</sup>). Le plateau entre les deux pHRR se situe autour de 90 kW/m<sup>2</sup> pour toutes les formulations, excepté pour les formulations 33Cop./33Sci./33Agr. et 75Cop./6Sci./19Agr., pour lesquelles le plateau est observé autour de 70 kW/m<sup>2</sup>.

Tab. 1 : Résultats d'essais en flexion 3 points (Cellule de Force = 10 kN, Vitesse = 0,1 mm/s) et au cône calorimètre (Irradiance = 50 kW/m<sup>2</sup>)

Ratio Biomasse	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ rupture (MPa)	TTI (s)	pHRR1 (kW/m <sup>2</sup> )	tpHRR1 (s)	HRR plateau (kW/m <sup>2</sup> )
100 Copeaux	819 ± 36	12,7 ± 3,5	42 ± 0	191 ± 9	63 ± 11	87 ± 13
100 Sciures	810 ± 10	10,3 ± 1,1	21 ± 0	199 ± 13	40 ± 7	91 ± 1
50 Cop. / 50 Sci.	812 ± 32	16,3 ± 1,9	34 ± 1	165 ± 1	50 ± 0	97 ± 18
66 Cop. / 33 Sci.	751 ± 4	10,1 ± 0,7	36 ± 9	164 ± 2	50 ± 7	91 ± 5
33 Cop. / 33 Sci. / 33 Agr.	813 ± 38	9,9 ± 1,1	29 ± 0	149 ± 2	43 ± 4	71 ± 1
75 Cop. / 19 Sci. / 6 Agr.	811 ± 12	11,3 ± 0,2	39 ± 7	174 ± 1	90 ± 14	90 ± 3
75 Cop. / 6 Sci. / 19 Agr.	819 ± 17	11,0 ± 0,6	27 ± 4	144 ± 7	43 ± 4	76 ± 1
Référence	600 ± 60	64,7 ± 21,3	32 ± 8	189 ± 17	43 ± 4	81 ± 3
75 Cop. / 19 Sci. / 6 Agr. + 5 RF	795 ± 26	En cours	19 ± 8	160 ± 0	30 ± 7	74 ± 4
75 Cop. / 19 Sci. / 6 Agr. + 10 RF	818 ± 26	En cours	22 ± 3	129 ± 1	33 ± 4	NR

$\sigma$  = Contrainte à la rupture en flexion (MPa) ; TTI = Temps d'ignition (s) ; pHRR1= Pic de débit calorifique (kW/m<sup>2</sup>) ; tpHRR1= durée du Pic de débit calorifique (s) ; HRR plateau = plateau de débit calorifique (kW/m<sup>2</sup>). Cop. = copeaux ; Sci. = Sciures ; Agr. = Résidus agricoles ; RF = Retardateur de Flamme.

En tenant compte à la fois des résultats des tests mécaniques et des essais de réaction au feu, la formulation 75Cop./19Sci./6Agr. a été reprise, et à laquelle ont été ajoutés 5 et 10 % de retardateurs de flamme (RF) à base de phosphore. Ces deux formulations ignifugées présentent des courbes de débit calorifique en fonction du temps très différentes des courbes des autres formulations ainsi que de la référence (Fig. 2). L'ignition se produit plus rapidement que pour l'échantillon de référence et toutes les autres formulations, ce qui est caractéristique de la présence de RF phosphorés, qui déstabilisent les matériaux en favorisant leur déshydratation et leur charbonnement. La formulation contenant 10 % de RF présente une extinction très rapide, juste après la survenue de l'ignition et du pHRR1 (après moins de 100 s) qui est d'ailleurs bien plus faible ( $pHRR_{75Cop./19Sci./6Agr.+10RF} = 129$  kW/m<sup>2</sup>). Il n'y a donc ni plateau de HRR, ni de

second pic, pHRR2. Le taux de résidu est très élevé (97 %) au moment de l'extinction. Ce taux de résidu correspond à une perte de masse de quelques grammes seulement, ce qui signifie que l'inflammation n'a concerné que le volume absorbant directement le flux de chaleur. La formulation contenant 5 % de RF a un comportement similaire, mais le pHRR1 est plus élevé ( $\text{pHRR}_{75\text{Cop./19Sci./6Agr.+5RF}} = 160 \text{ kW/m}^2$ ) et l'extinction n'a lieu qu'après 600 s après un pseudo-plateau autour de  $75 \text{ kW/m}^2$  et le taux de résidu à l'extinction reste élevé (80 %) mais tout de même moindre. Par conséquent, le RF utilisé se révèle donc très efficace pour assurer l'extinction rapide de l'échantillon en conditions de combustion forcée à une irradiance relativement élevée.

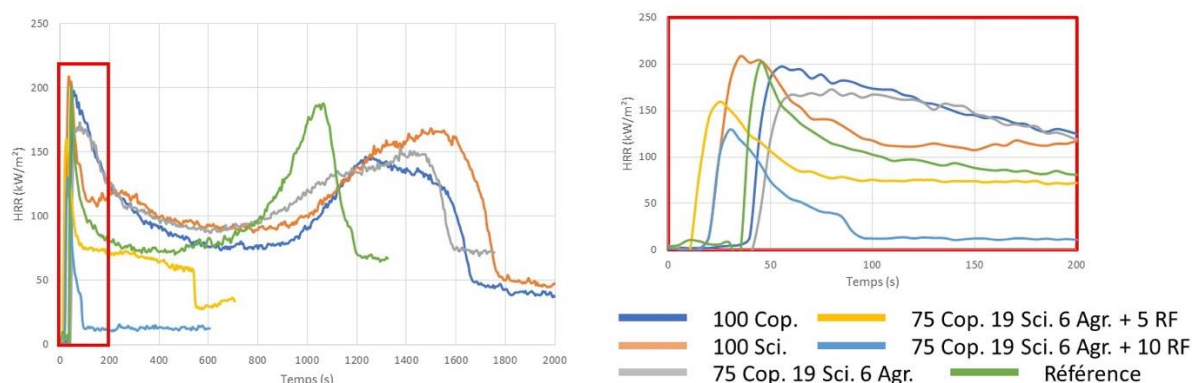


Fig. 2 : Courbes HRR=f(temps) obtenues au cône calorimètre

## Conclusions et perspectives

Les travaux menés dans le cadre de ce projet ont permis de développer une technologie simple et robuste de production de matériaux composites thermiquement épais de densité élevée ( $800 \text{ kg/m}^3$ ). De plus, l'optimisation des formulations a permis d'aboutir à des matériaux présentant des propriétés mécaniques satisfaisantes pour l'application visée en tant que matériau de menuiserie d'intérieur. L'ajout du RF sélectionné a permis d'ignifuger de manière très efficace ces matériaux composites. Des essais de résistances mécaniques et des essais de durabilité biologique (champignons lignivores et termites souterrain) sont en cours d'analyse sur les deux formulations ignifugées, qui représentent les matériaux les plus prometteurs.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État au titre du Programme d'Excellence I-SITE de l'Université de Montpellier, dans le cadre du Plan d'Investissement France 2030. Les auteurs souhaitent donc remercier le Programme d'Excellence I-site montpellierain pour l'attribution du financement « Companies on Campus » pour le projet RECOMPOSE ainsi que les collègues d'IMT-Mines Alès pour les analyses au cône calorimètre.

## Références

- EN 117 (2023) Produit de préservation du bois - Détermination du seuil d'efficacité contre les termites européens du genre *Reticulitermes* (Méthode de laboratoire). Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, Belgique, pp. 23.
- EN 113-2 (2020) Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Méthode d'essai vis-à-vis des champignons basidiomycètes - Partie 2 : détermination de la durabilité inhérente ou améliorée. Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, Belgique, pp. 31.

Le Courbe A, Carayon L, Candelier K, Viretto A (2023). Valorisation de biomasses résiduelles de menuiserie en matériau composite, 12<sup>èmes</sup> Journées scientifiques du GDR Sciences du Bois, Limoges, 22-24 novembre 2023.

NF EN 310 (1993) Panneaux à base de bois – Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion.

NF ISO 5660-1 (2015) Essais de réaction au feu — Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse, Partie 1: Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique), AFNOR

Schartel B., Hull TR (2007) Development of fire-retarded materials - Interpretation of cone calorimeter data, Fire and Materials, 31(5): 327-354

## Le Cèdre de l'Atlas, de la graine aux produits finis : ressource et caractérisation du bois

QUERNEC Léane<sup>1</sup>, LANVIN Jean-Denis<sup>2</sup>, REULING Didier<sup>2</sup>, LECOURT Mickaël<sup>2</sup>, PAULMIER Ivan<sup>2</sup>, GABILLE Martine<sup>2</sup>, L'HOSTIS Clément<sup>2</sup>, PIECZAK Lucas<sup>2</sup>, LEGAY Stéphane<sup>2</sup>, MONNARD Sylvain<sup>2</sup>, REYNAUD Céline<sup>2</sup>, RAPHALEN Elisabeth<sup>2</sup>, MAGNE Nicolas<sup>2</sup>, CHERON Nicolas<sup>3</sup>, ELVIRA Mickaël<sup>3</sup>, MEWTON Simon<sup>3</sup>, BAUDRILLER-CACAUD Haimad<sup>4</sup>, LEMAIRE Jean<sup>4</sup>

<sup>1</sup>FIBOIS SUD PACA

<sup>2</sup>FCBA

<sup>3</sup>Office national des Forêts

<sup>4</sup>Centre National de la Propriété Forestière

[l.quer nec@fibois-paca.fr](mailto:l.quer nec@fibois-paca.fr)

**Mots clefs :** Cèdre de l'Atlas ; bois d'œuvre ; résistance mécanique ; imprégnabilité ; changement climatique ; forêt ; filière bois

### Contexte et objectifs

Le changement climatique repousse les limites des essences forestières traditionnellement adaptées à leur environnement et conduit à des taux de mortalité inquiétants chez certaines essences pourtant bien implantées. La crise des scolytes affectant les épicéas, exacerbée par le changement climatique, en est un exemple frappant. Face à cette situation, il est crucial de diversifier les essences forestières et de trouver des alternatives résilientes. Le **Cèdre de l'Atlas** (*Cedrus atlantica*), originaire du bassin méditerranéen et implanté en France depuis près de 300 ans, se distingue par sa résistance aux sécheresses estivales et sa capacité d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques. Principalement présent dans les régions Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur, le Cèdre de l'Atlas semble constituer une essence d'avenir pour le reboisement et la gestion durable des forêts françaises.

L'objectif général du projet est de caractériser le Cèdre de l'Atlas dans son ensemble, depuis la graine jusqu'aux produits finis, afin de mieux comprendre son fonctionnement, ses usages potentiels et d'anticiper les besoins futurs.

### Matériel et méthode

Le projet s'articule autour de trois axes de travail.

#### *Évaluation de la ressource*

- Afin d'évaluer la ressource actuelle et future en Cèdre de l'Atlas en France, l'ONF et le CNPF ont effectué un inventaire exhaustif. Le CNPF a réalisé cet inventaire à l'aide des plans de gestion des propriétaires privés et un export des données de l'IGN issues des différentes campagnes d'inventaire de l'IFN a été réalisé par l'ONF.
- Pour analyser la réaction du Cèdre vis-à-vis du changement climatique et identifier les zones propices à son implantation en France, la méthodologie BIOCLIMSOL a été appliquée. Développée par le CNPF, elle est basée sur une analyse statistique d'un échantillon de 85 placettes situées en région PACA, région très exposée au changement climatique. La régression PLS (partial least squares) permet ensuite d'établir des modèles pour expliquer le pourcentage de tiges dégradées (selon la méthode du Département de la Santé des Forêts)

ainsi que l'intensité de nécroses qui sont préjudiciables pour la valorisation et la transformation du bois.

#### *Caractérisation technique du bois*

- Résistance mécanique : 720 échantillons de bois (3 sections : 104x50 mm<sup>2</sup>, 158x600 mm<sup>2</sup> et 181x74 mm<sup>2</sup>) ont été testés en flexion 4 points pour évaluer le module d'élasticité et la contrainte à la rupture, en vue de leur classification en classes de résistance (C14, C18, C24). Ces essais ont été réalisés sur des bois provenant de cinq stations représentatives. L'objectif est d'inscrire le Cèdre de l'Atlas dans la norme NF B52 001 afin que son utilisation fasse partie de la « technique courante en construction ».
- Dureté Brinell : Mesurée en fonction de l'empreinte résiduelle laissée par le poinçon sur la surface du matériau, indiquant sa résistance au poinçonnement.
- Durabilité naturelle :
  - Mycologie : Conditions d'essai selon EN 113-2 Des échantillons de trois placettes ont été exposés 16 semaines à deux espèces de champignons de pourriture cubique : *Coniophora puteana* (coniophore des caves) et *Rhodonia placenta* (polypore placenta). L'essence de référence est le Pin sylvestre (aubier).
  - Entomologie :
    - Capricorne des maisons *Hylotrupes bajulus* avec le dispositif d'essai de la norme EN 46-1
    - Petite vrillette, *Anobium punctatum* avec le dispositif d'essai de la norme EN 49-1
    - Terme souterrain, *Reticulitermes flavipes*, avec le dispositif d'essai de la norme EN 117
- Imprégnabilité : Le bois, ayant une teneur en eau comprise entre 13% et 18% a été soumis à un traitement sous vide-pression de 3 heures pour évaluer sa capacité à absorber des agents de préservation.
- Réaction au feu : Des essais SBI (Single Burning Item) ont été réalisés sur un profil de bardage rainure et languette de 21 mm d'épaisseur, selon la norme NF EN 13823+A1 2022. Ce test consiste à exposer le bois à un brûleur de puissance 30 kW pendant 20 minutes.
- Extractibilité : L'extraction des différentes parties de l'arbre (tronc, branches, aiguilles) est réalisée par 2 processus :
  - Entrainement à la vapeur : réalisation d'huiles essentielles.
  - Extraction accélérée par solvant (ASE) pour les extraits organiques.
- Séchage : Trois types de séchage ont été testés sur un échantillon de 192 planches pour une humidité cible de 14 % afin de définir quelle méthode et quel cycle sont le plus adaptés au bois de Cèdre :
  - Un cycle de séchage sous vide.
  - Un cycle de séchage à air chaud climatisé (ACC).
  - Un cycle de séchage « à l'air libre ».

#### *Communication et normalisation*

- Diffusion des résultats à travers des colloques, des publications scientifiques et des réunions avec les acteurs de la filière forêt-bois.
- Travail de normalisation avec les comités normatifs pour intégrer le Cèdre dans la norme NF B52 001 (bois d'œuvre).

## Résultats et discussion

Les résultats obtenus au cours de ce projet sont prometteurs pour l'avenir du Cèdre de l'Atlas en tant que bois d'œuvre. Les principaux résultats sont :

### - Ressource forestière :

L'inventaire réalisé a permis d'identifier une ressource de 15 500 ha en forêt publique et d'estimer que cette surface pourrait croître si des plantations sont encouragées. Le Cèdre de l'Atlas se distingue par sa capacité à résister aux sécheresses estivales, mais sa sensibilité au gel tardif et aux températures extrêmes (-25°C) reste un enjeu à surveiller.

### - Résistance mécanique :

Il sera possible de classer le Cèdre de l'Atlas visuellement dans les classes de résistance C18 et C14. Si les fabricants de machines de classement par résonance intègrent les valeurs obtenues lors de ces essais dans leur base de données, il sera également possible de classer le Cèdre dans la classe C24 à l'aide de ces machines.

### - Dureté Brinell :

Le Cèdre de l'Atlas est classé dans la catégorie B, ce qui signifie qu'il est adapté pour un usage domestique modéré à élevé (épaisseur > 2,5 mm) ou commercial modéré (épaisseur > 7 mm).

### - Imprégnabilité :

Les tests ont révélé une faible imprégnabilité du duramen (classe 4 – Non imprégnable), mais une imprégnabilité modérée de l'aubier (Classe 1-2 – Imprégnable à moyennement imprégnable). L'aubier pourrait donc être imprégné de produit de préservation si besoin.

### - Durabilité naturelle :

Le Cèdre présente une bonne résistance aux insectes et aux champignons lignivores (Tab. 1).

Tab. 1 : résultats des essais de durabilité du Cèdre de l'Atlas

Champignons lignivores	Capricorne des maisons	Petite vrillette	Termites souterrains
Très durable	Durable	En attente	Moyennement durable

Bien que les résultats complets soient encore en attente, la classe de durabilité 3 pourrait être atteinte. En l'absence de tests d'exposition à la pourriture molle, la classe 4 n'est pas atteignable pour le moment. Cependant, viser cette classe semble réaliste et ferait du Cèdre de l'Atlas la deuxième essence française à y parvenir.

### - Réaction au feu :

Suite aux trois essais SBI effectués sur le même profil de bardage, le bardage rainure et languette en Cèdre de l'Atlas de 21 mm a obtenu le classement EUROCLASSE D-s1-d0. Ce résultat démontre que le Cèdre de l'Atlas présente une réaction au feu similaire à celle des autres essences de bois couramment utilisées en construction. Les tests ont confirmé que, malgré son odeur spécifique et la présence de certains composés volatils, sa réaction au feu n'est pas plus défavorable que celle des autres types de bois.

- *Extractibilité :*

L'analyse des extractibles a révélé une variété de molécules connues dans la « littérature des analyses du Cèdre de l'Atlas », notamment des sesquiterpènes, des monoterpènes, des diterpènes ainsi que leurs dérivés. Le duramen est riche en  $\beta$ -himachalène et en atlantones, tandis que les aiguilles contiennent davantage de terpènes comme l' $\alpha$ -pinène. L'écorce et l'aubier partagent des composés similaires au duramen mais en quantités plus faibles. Ces molécules offrent un potentiel de valorisation bien qu'une purification des extraits soit nécessaire pour isoler ces composés complexes et en tirer un usage optimal. Des techniques de purification doivent donc être développées pour améliorer la qualité des extraits.

- *Séchage :*

Le séchage « à l'air libre » est la méthode qui a été la moins génératrice de déformations lors de l'étude. Il est fondamental de noter que les conditions d'essai pour ce mode de séchage étaient idéales : bois couverts avec un débord important, lattage adapté, pile de dimension réduite ... Il n'en demeure pas moins qu'une mesure de la teneur en eau est nécessaire tout au long du processus.

### **Conclusion et perspectives**

Le projet "Le Cèdre de l'Atlas, de la graine aux produits finis" a permis de démontrer le potentiel de cette essence pour répondre aux enjeux du changement climatique et aux besoins de la filière bois. Les résultats montrent que le Cèdre possède des qualités techniques qui en font un candidat prometteur pour la construction et le reboisement, sous réserve de sa normalisation en tant que bois d'œuvre.

Les perspectives incluent :

- Le développement de nouvelles plantations pour augmenter la disponibilité de la ressource.
- La poursuite des travaux de normalisation pour faciliter l'intégration du Cèdre dans les projets de construction : Tests de durabilité du bois vis-à-vis de la pourriture cubique dans l'objectif d'atteindre la classe de durabilité 4, test de durabilité vis-à-vis des termites dans l'objectif d'atteindre le classement « durable ».
- La présentation des résultats mécaniques à un comité pour valider la compatibilité entre les observations visuelles et les données obtenues via la machine MTG. Cela permettra ensuite d'intégrer ces données dans les systèmes MTG utilisés par les scieurs.

### **Remerciements**

Projet co-porté par FIBOIS SUD PACA, FIBOIS Occitanie, FNB Provence-Alpes, France Forêt PACA.

Projet financé par les Régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie, France Bois Forêt, Le Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt.



## Monitoring and modelling of the vibratory behaviour of an 8-storey timber building

Dorian JANOT<sup>1</sup>, Florent VIEUX-CHAMPAGNE<sup>1</sup>, Philippe GUEGUEN<sup>2</sup>,  
Clément BOUDAUD<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS, 3SR, F-38000, Grenoble France

<sup>2</sup>ISTerre, Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, IRD, Université Gustave Eiffel, Grenoble, France

<sup>3</sup>ESB, LIMBHA, Nantes, France

[clement.boudaud@esb-campus.fr](mailto:clement.boudaud@esb-campus.fr)

**Key words:** High-rise timber building; Vibratory behaviour; Operational Modal Analysis; Continuous monitoring

### Context and objectives

The implementation of long-term monitoring techniques remains relatively limited, and more research is needed to improve long-term serviceability related to vibration-induced criteria, such as the DynaTTB project (Abrahamsen et al 2020) which launched an international project on wind-induced vibrations in tall timber buildings related to comfort criteria for inhabitants. Our understanding of the dynamic response and structural condition of actual high-rise timber buildings currently faces several scientific issues related to:

- the paucity of experimental data for such buildings and in different structural conditions;
- the specific response of the building for nominally equivalent buildings with almost the same designs;
- the operational and environmental long-term effects on building condition.

In the literature, most modal analysis testing concerns mid-rise timber structures, based on single measurements and only a few examples of continuous monitoring, and with partial information (e.g., Feldmann et al 2016, Mugabo et al 2019). For example, Tulebekova et al (2023) showed the 18-month variation of modal parameters (resonance frequencies) caused by environmental conditions in an 18-storey glulam frame building, located in Brumunddal (Norway), without considering wind speed.

Vibration amplitude, resonant frequency and damping are the key dynamic parameters for a design consistent with serviceability limit state (in this study vibrational comfort). In view of the growing number of high-rise timber buildings, Operational Modal Analysis (OMA) techniques are required to analyse the structural response of real buildings, both during different construction phases and their long-term usage.

The aim of this paper is to investigate the dynamic response of the Haut-Bois Grenoble (France) building, an 8-storey Cross Laminated Timber (CLT) shear panel building. The originality of this study is that it monitors over a three-year period the vibrational behaviour of the building and its environmental conditions.

In the following section, this paper describes the building itself, the datasets used for this study, the data processing methods, and some results of the continuous monitoring.

## Material and methods

### Description of the Haut-Bois

The “Haut-Bois” is a set of two residential timber buildings of 56 apartments, 5 and 8 storeys high (18 m and 28 m respectively) and covered with zinc cladding (Fig. 1). This study focuses on the 8-storey building only. There is no concrete core in the buildings. The height and plan dimensions (HxLxW) are 28x16x21m. Each storey has multiple balconies, from 5 to 9m<sup>2</sup>. Access to the building is via an exterior concrete stairwell (Fig. 1a), separated by 14cm wide seismic joints between the timber structures and the concrete stairwell. Each storey is made of CLT for the shear walls. Floors are made by a combination of CLT panels, glulam beams and some I-section steel beams for the large spans (Fig. 1b).

### Measurements and dataset

Measurements are based on the OMA technique under Ambient Vibrations (AV). Punctual measurements have been performed several times during the construction phase and the early stages of the occupancy of the building. Permanent monitoring has started towards the end of the construction phase. Construction started in 2020, and the first AV measurement was recorded during construction on March 11, 2021. Continuous monitoring started on January 1, 2022, and the residents move in at the end of March 2022. Fig 1c displays the sensors positions of the different dataset, while Fig. 2 presents the chronology of the different measurements.

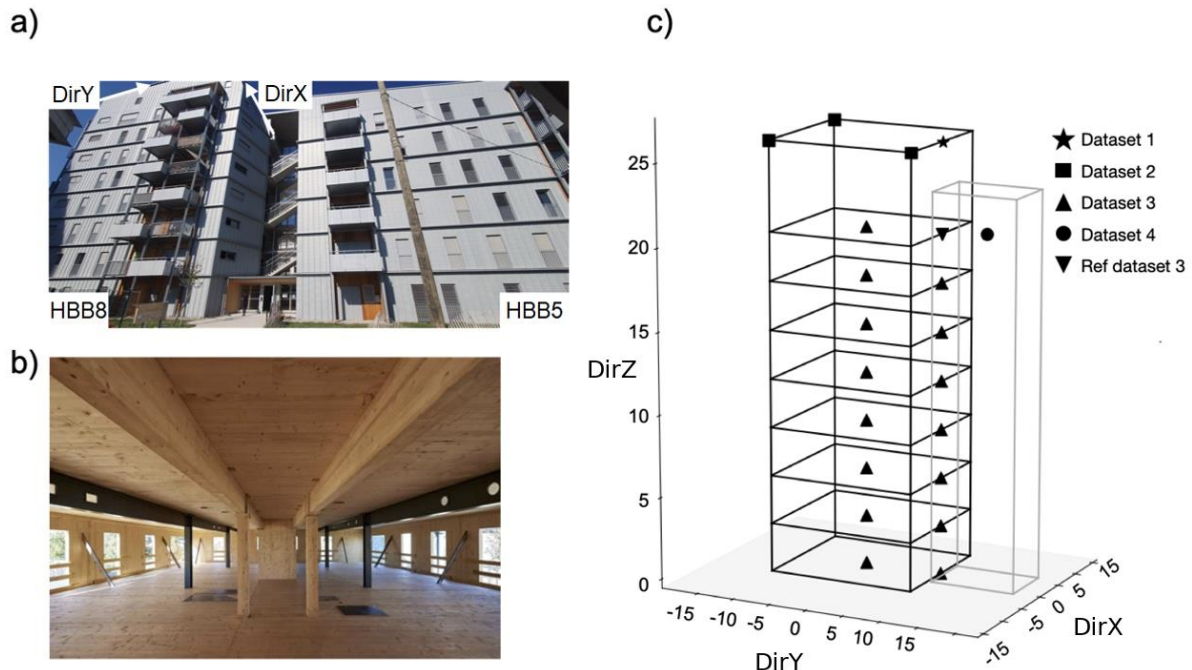


Fig. 1: View of the 8 storey building. a) General view with direction considered for modal analysis. b) Interior view of main structure of a regular storey. c) Experimental setup deployed in the building during the three phases: construction phase (dataset 1), monitoring (dataset 2) and modal analysis (dataset 3).

Measurements from the stairwell (dataset 4) are also displayed.

Dataset 1 (construction phase) corresponds to three single AV recordings made during three different construction phases. Ambient vibrations were recorded at one point on the top floor with a Cityshark II 24bits datalogger (Chatelain et al 2012) and one 3-component 3DLite Lennartz velocimeter (cutoff frequency 1Hz). One measurement of 10 minutes at a frequency rate of 200 Hz was recorded on March 11, May 25 and June 3, 2021. On March 11, 2021, most of the vertical and horizontal structural elements and the external framework were complete.

Zinc cladding was being installed at the time. On May 25, 2021, the structural work and exterior framing were complete. On June 3, 2021, plasterboard was being installed as internal finishing.

Dataset 2 (monitoring phase) corresponds to the semi-permanent network installed for SHM. It is part of the National Building Array Program (NBAP) in France, launched in 2004 by the French Accelerometric Network. The dataset in this study used three stations (HB01, HB02, HB03) located in three corners of the building in the attic (Fig. 1c). 24-bit Nanometrics dataloggers, coupled with high-sensitivity 3-component Lennartz 3D-5s velocimeters. The configuration was defined to measure bending, torsion and soil-structure interaction thanks to a fourth station (HB04), installed four months after at the bottom of the building, and not used for this study. An example of one hour of data recordings in the building is given Fig. 3a with the corresponding averaged Fourier spectra in Fig. 3b. The horizontal channels are oriented North-South and East-West (EHE, EHN, EHZ), which correspond to the main direction of the building (i.e., DirX and DirY, and DirZ, respectively). All data are open and available (Guéguen and Vieux-Champagne 2023).

Dataset 3 (OMA phase) corresponds to the full-scale operational modal analysis carried out on June 13, 2022, once all the residents had moved in. Five datasets were recorded for 10 minutes at a frequency rate of 200Hz. One reference sensor was left on the top floor, but the other sensors were mobile, roaming the hallway of each storey. The reference sensor is needed to normalize the recordings before applying Frequency Domain Decomposition for OMA. Finally, two recordings per floor were obtained in the building (Fig. 1c).

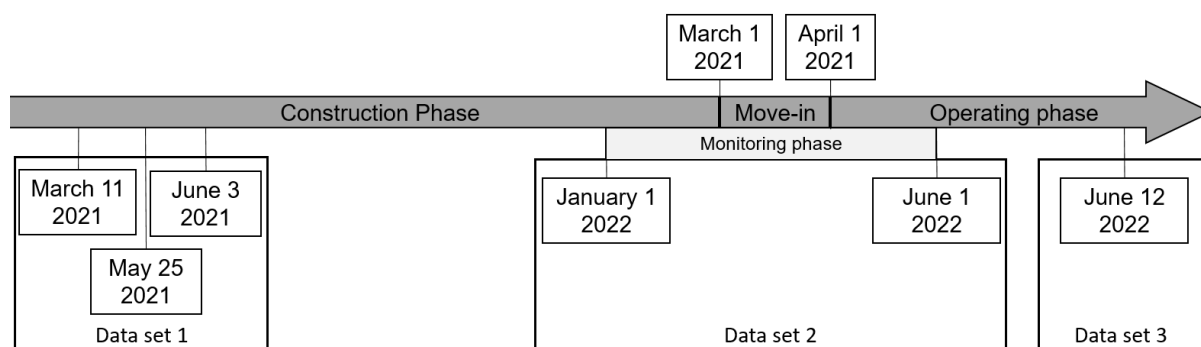


Fig. 2: Timeline description of the different HBB8 data sets during the different phases of the CLT building

### *Data processing method*

For dataset 1, the resonance frequency analysis was performed using a Fast-Fourier Transform computed on overlapping Hanning windows (1 minute in length) and averaged over the 10 min recordings. The resonance frequencies were then picked from the averaged spectrum considering a parametric approach assuming that the highest amplitude peak corresponds to the fundamental resonance frequency in both translation directions (DirX and DirY) and the third peak corresponds to the torsion mode (rotation around the vertical axis DirZ). These three peaks, interpreted as translation and torsion, were validated a posteriori by the OMA phase (dataset 3). An example of such processing is presented Fig 3b.

Two more advanced OMA methods were applied to datasets 2 and 3. The choice of RDT (Ibrahim, 1977) for dataset 2 and FDD (Brincker et al 2001) for dataset 3 results from the long experience acquired by the authors on operational application of these methods: for OMA (Michel et al 2010) and for the monitoring of resonance frequencies and damping values (Guéguen et al 2016).

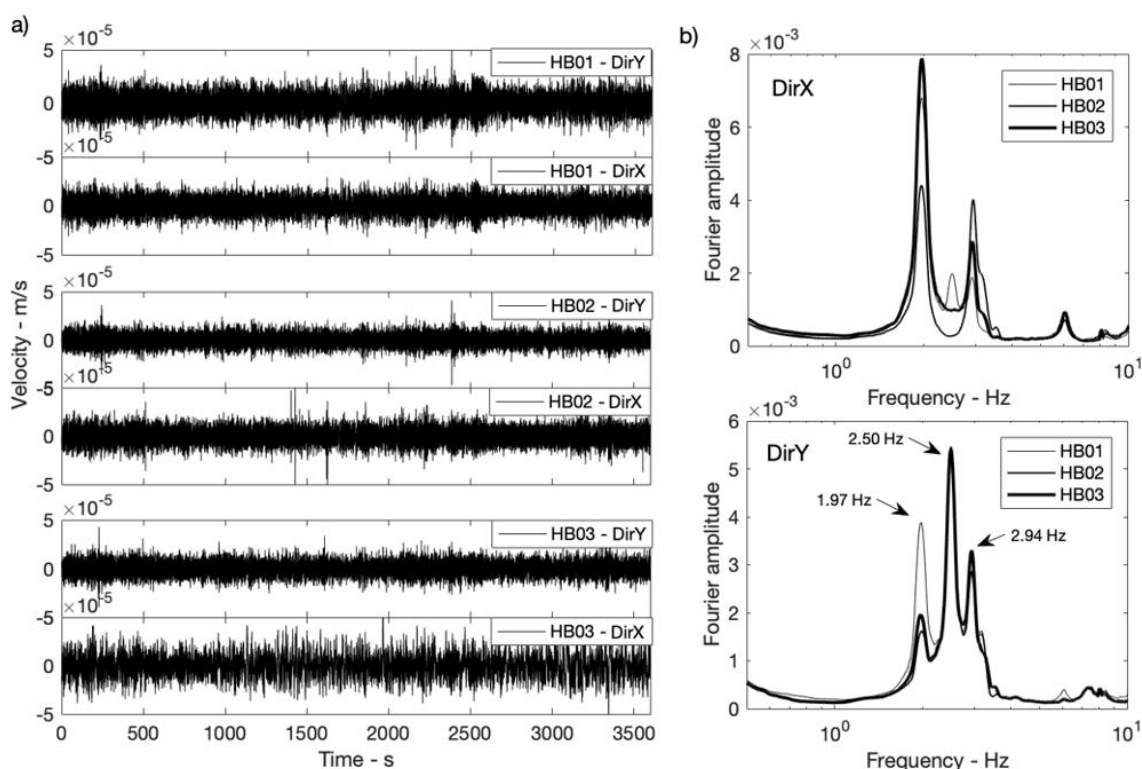


Fig. 3: Examples of dataset 2 (2022/02/01-12:00:00 - 2022/02/01-13:00:00), corresponding to the semi-permanent stations HB01, HB02 and HB03 in both horizontal direction (DirX and Dir Y), in time (a) and frequency (b) domain. The Fourier spectra are averaged Fourier spectra 1 minute long. The peak values indicated correspond to the first resonance modes in DirX (1.97Hz), DirY (2.50Hz) and DirZ (2.94Hz).

## Results and discussion

### *Code provisions versus measured modal parameters*

The empirical value of fundamental frequency ( $F_r$ ) is given as a function of building height, i.e.,  $F_r=46/H$  according to EC1 Part 1-4 (Eurocode 1 2007) specifically for cantilever structures over 28m and  $F_r=20 \cdot H^{-0.75}$  according to EC8 (Eurocode 8 2013), which corresponds to 1.64Hz in both cases ( $H=28m$ ). This value can be compared to 1.85Hz, which is measured on April 1<sup>st</sup>, 2022, when all residents are installed.

For damping, more variability is expected due to the timber building population considered (Eurocode 5 2014), EC1 suggests an empirical damping value of about 1% for sizing under wind loads, and EC8 suggests 5% for seismic loads. This value can be compared to 1.95%, which is measured in February 2022.

### *Evolution of modal parameters (construction phase and early operating phase)*

Using datasets 1 and 2, the modal parameter variations are assessed during the construction phase, the residents' moving-in phase, and the early operating phase of the building. These variations result from modifications to the structure during the construction phase, occupancy and weather conditions. During the monitoring phase, only the modal parameters (frequency and damping) from one station (HB02) are considered because of their similitude (Fig. 3b).

Fig. 4 shows the variations of the resonance frequencies during the construction and operating phases (dataset 1 and 2). The first value on March 11, 2021, corresponds to the installation of the battens in the roof structures. Two months later (i.e., the May 25, 2021 - 75 days), a drop to

2.18 Hz (-15%), 2.83 Hz (-12%) and 3.44 Hz (-21%) is observed in X, Y and Z direction, respectively, due to the end of the structural elements and exterior carpentry.

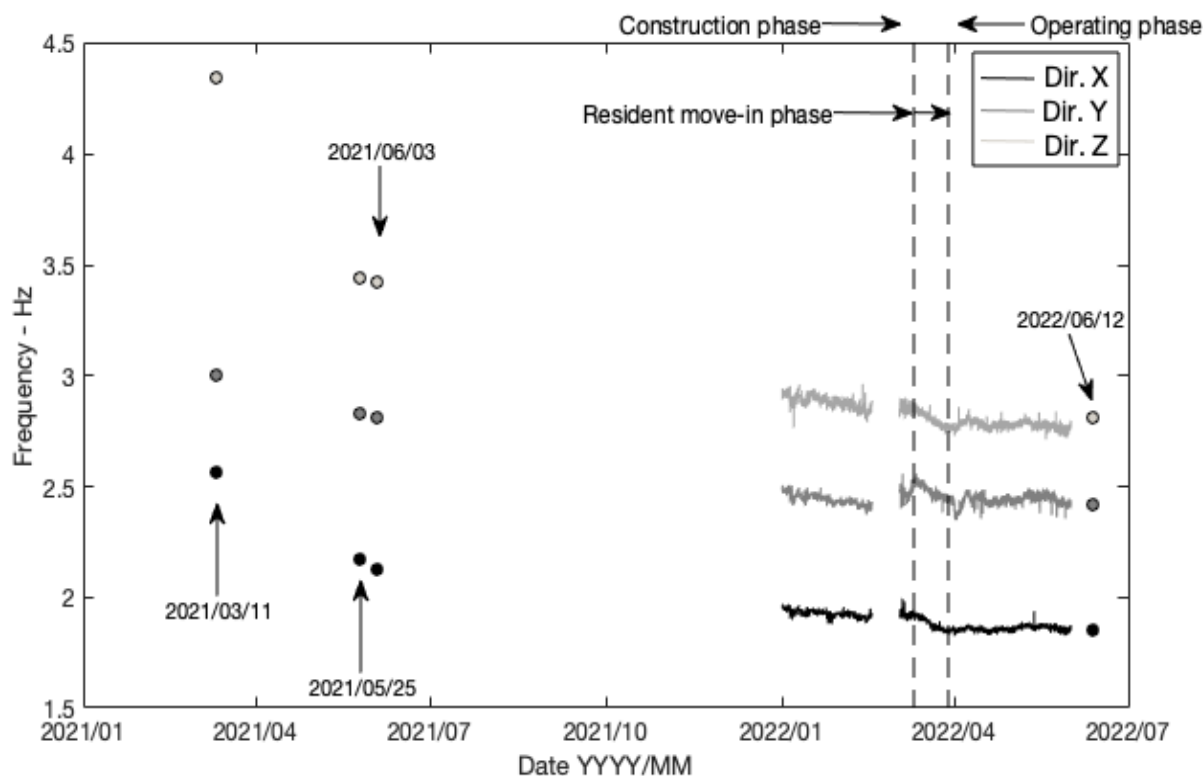


Fig. 4: Variations of the resonance frequency in DirX, DirY and DirZ with the different phases of the OMA and the SHM.

If we assume that the drop of frequency during the resident move-in phase is only due to mass addition, it corresponds to a total mass of 87 tons. If uniformly distributed along all the floors, it corresponds to a 30daN/m<sup>2</sup> load, which seem coherent.

## Conclusion

Further analysis will combine evolution of modal and environmental parameters. Search for correlations will try to identify the environmental parameters having the most significant effect on modal parameters. Measured horizontal accelerations, especially during high wind speed episodes, will be compared to comfort threshold for residents' comfort.

## Acknowledgements

The financial support for this study is provided by IRGA and gratefully acknowledged. Authors would like to thank LabEx OSUG@2020 (Investissements d'avenir-ANR10LABX56). Thanks to Actis for the agreement-in-principle for letting us investigate the building and allowing more data on the vibratory aspect of CLT tall timber building to be studied.

## References

Abrahamsen R, Bjertnaes M-A, Bouillot J, Brank B, Cabaton L, Crocetti R, Tulebekova S (2020) Dynamic response of tall timber buildings under service load: The Dynattb research program, in EURO DYN 2020, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 22–24 June 2020 (pp. 4900-4910). National Technical University of Athens.

Brincker R, Zhang L, Andersen P (2001) Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart materials and structures*, 10(3), 441.

Chatelain J-L, Guillier B, Gueguen P, Fréchet J, Sarrault J (2012) Ambient vibration recording for single-station, array and building studies made simple: CityShark II, *International Journal of Geosciences*, 3, 1168-1175.

Eurocode 1 (2007) Actions on Structures - Part 1-4: General Actions - Wind Actions. EN 1991-1-4.

Eurocode 5 (2014) Design of Timber structures - Part 1-1: General - Common Rules and Rules for Buildings. EN 1995-1+A1+A2.

Eurocode 8 (2013) Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1+A1.

Feldmann A, Huang H, Chang W, Harris R, Dietsch P, Gräfe M, Hein C (2016) Dynamic properties of tall timber structures under wind-induced vibration, In *World conference on timber engineering*.

Guéguen P, Vieux Champagne F, (2023) Monitoring of the Hautbois Wooden High-Rise building in Grenoble, France (RESIF-SISMOB). RESIF - Réseau Sismologique et géodésique Français. doi:10.15778/resif.8n2021

Guéguen P, Johnson P, Roux P (2016) Nonlinear dynamics induced in a structure by seismic and environmental loading, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), 582-590.

Ibrahim S-R (1977) Random decrement technique for modal identification of structures, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 14(11), 696-700.

Michel C, Guéguen P, El Arem S, Mazars J, Kotronis P (2010) Full-scale dynamic response of an RC building under weak seismic motions using earthquake recordings, ambient vibrations and modelling, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(4), 419-441.

Mugabo I, Barbosa A-R, Riggio M (2019) Dynamic characterization and vibration analysis of a four-story mass timber building, *Frontiers in Built Environment*, 5, 86.

Tulebekova S, Malo K-A, Ronnquist A, Navik P (2023) Investigations of long-term modal properties of a tall glue-laminated timber frame building under environmental variations, *Proceedings from the 13th World Conference on Timber Engineering*, pp. 2950–2957.

## Construction de mâts en bois : à la croisée du savoir-faire traditionnel et de l'innovation

LEPECQ Yannig<sup>1,2</sup>, ZAMBALDI Samuel<sup>1</sup>, ARNOULD Olivier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Entreprise Woodspars - Charpentier Marine Morbihan, Locmariaquer, France

<sup>2</sup>Master 2 Sciences du bois, Faculté des Sciences, Univ Montpellier, Montpellier, France

<sup>3</sup>Equipe Bois, LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Contact : [yannig.lepecq@etu-umontpellier.fr](mailto:yannig.lepecq@etu-umontpellier.fr)

**Mots clefs :** mâts ; bois ; lamellé-collé ; charpente marine ; durabilité ; résistance mécanique

### Contexte et objectifs

La construction de mâts en bois réunit de nombreux savoir-faire de la charpente navale, nécessite une grande précision et de la rigueur tout au long du procédé. En particulier, la fabrication d'espars en lamellé-collé fait intervenir des notions d'artisanats traditionnels mis en œuvre depuis des siècles, mais demande également des techniques nouvelles et innovantes, afin de garantir la sécurité des marins et la résistance dans le temps du mât face aux agents de dégradation du bois (De Chapman 1871). Ces notions de durabilité et de résistance mécanique pour ce type de lamellé-collé artisanal n'ont jamais été testées auparavant. L'objectif de ce stage de Master 1 était donc, d'une part, de mettre en lien les sources bibliographiques récentes sur le BLC (Bois Lamellé-Collé) et de transposer ces connaissances aux mâts et, d'autre part, d'élaborer un test de résistance mécanique d'une portion de mât afin de classer le BLC produit dans l'entreprise.

Des essais mécaniques en flexion ont été réalisés pour caractériser le matériau en lui-même et non un objet entier. Les résultats obtenus donnent des indications intéressantes et transposables au dimensionnement d'un mât complet. Grâce au gréement dormant, un mât est principalement sollicité en compression (Fig. 1) et, du fait de son élancement, le risque de ruine principale est dû au flambement. Comme observé sur la figure 1, la plupart des tensions exercées par le gréement ou les voiles se traduisent par une compression au niveau du mât. (Wolfer 1991).

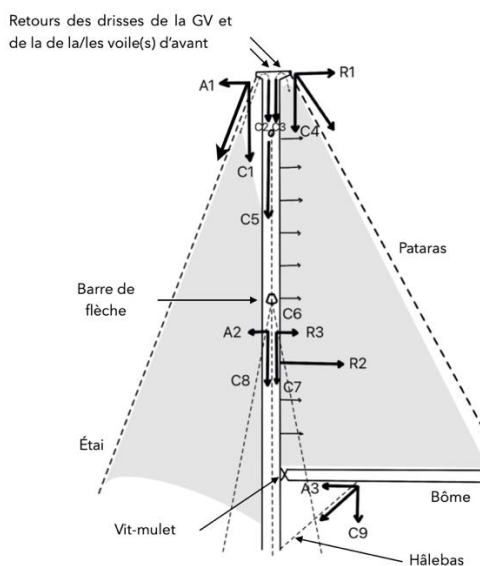


Fig. 1 : Détails d'un gréement bermudien et répartition des forces s'exerçant sur le mât dans le sens longitudinal.

Ainsi les essais en flexion apportent les données principales nécessaires pour l'utilisation des formules d'Euler (Lemagorou 2018) pour la résistance des mâts au flambement (MOE).

### Matériel et méthode

Les poutres d'essai sont fabriquées dans des blocs de BLC conçues par l'entreprise Woodspars. Six d'entre elles sont conçues en BLC artisanales avec du Pin d'Oregon, aboutées grâce à des écarts (enture en biais), et quatre autres ont été conçues par une entreprise tierce de BLC industriel, avec des aboutages droits.

Les différents blocs sont rabotés à une section de 5 par 10 cm, puis deux blocs de même fabrication sont collés ensemble afin d'obtenir une poutre. Enfin, chaque poutre est mise aux dimensions grâce à une raboteuse 4 faces : section de 8 par 8 cm, longueur de 190 cm.

On distingue donc le premier collage, avec l'assemblage des lamelles par écarts et aboutages, qui forme les blocs et qui a été réalisé en amont des tests, et le deuxième collage de deux blocs assemblés pour obtenir les poutres de tests. La distinction de ce premier et deuxième collage est utile pour l'identification des biais lors des tests, ainsi que des défauts de collage et l'étape à laquelle ils sont apparus.

Le banc d'essai de flexion 3 points a été conçu et fabriqué dans l'entreprise (Fig. 2). Le cadre est constitué de poutres d'acier suffisamment résistantes pour supporter la contrainte exercée par le treuil sur la poutre. Le support métallique est mécanosoudé à l'arc, et les barres de contreventement sont nécessaires pour rigidifier l'ensemble. Pour une plus grande précision des mesures, la force sera d'abord appliquée à l'aide d'un palan jusqu'à 10 kN, puis relâchée, puis à nouveau appliquée jusqu'à rupture. Cette répétition de la force exercée est effectuée sur 6 poutres différentes de mêmes dimensions de BLC artisanale et 4 poutres de BLC industriel, afin de s'affranchir au maximum des défauts présents dans le bois.

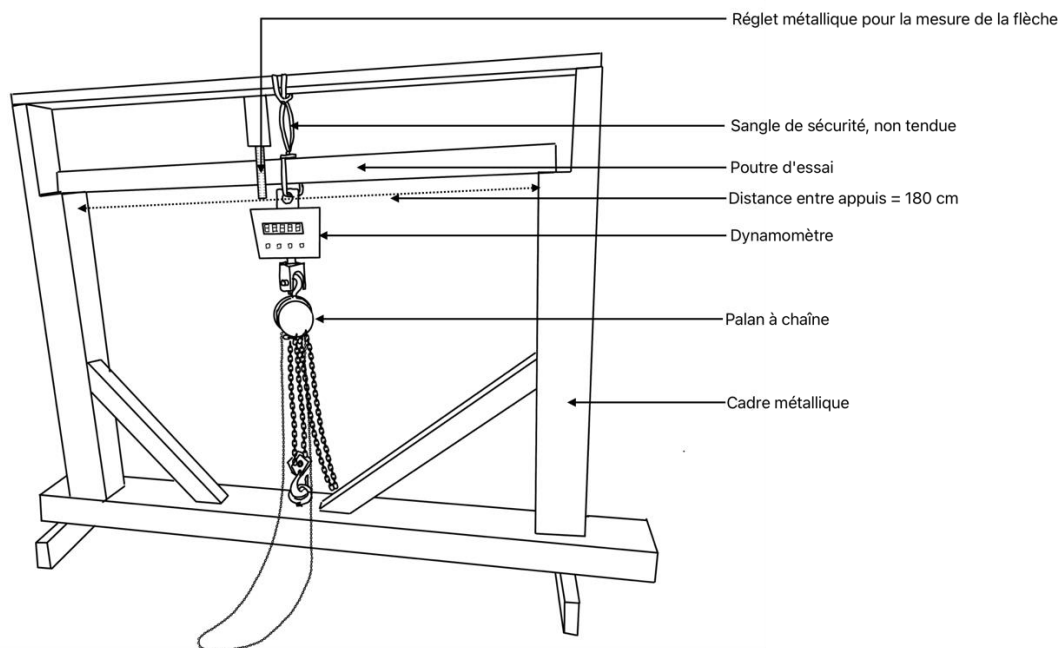


Fig. 2 : L'installation de l'essai mécanique.



## Premiers résultats - Conclusion

Les résultats des tests de flexion statique et de flambage des poutres en Pin d'Oregon, différenciant les techniques d'aboutage utilisées, sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Les poutres 1 à 6 sont en lamellé-collé artisanal avec aboutage en biais (scarf en anglais), tandis que les poutres 7 à 10 sont en lamellé-collé industriel avec des aboutages droits.

Les charges critiques en flambement sont calculées à partir de la formule d'Euler, avec les conditions d'application pour une poutre encastree libre.

Si le bois lamellé-collé offre une meilleure résistance à la flexion comparée au bois massif, on observe grâce à ces tests une différence de résistance entre le BLC artisanal et industriel. En moyenne, le MOE d'une poutre en BLC artisanal est de 19,6 GPa, contre 17,3 GPa pour le BLC industriel.

Ces résultats suggèrent donc une meilleure résistance à la flexion du BLC artisanal par rapport au BLC classique. Les entures en biais utilisées dans ce procédé de fabrication, seule différence entre les deux méthodes de conception, peuvent être considérées comme étant à l'origine de cette différence. On peut suggérer qu'elles répartissent plus uniformément les surfaces encollées, améliorant ainsi la cohésion et la résistance mécanique par rapport aux autres BLC industriels qui utilisent des entures droites, ce qui corroborerait l'étude de Bertino et Marchaison (2011).

Tab. 1 : Caractéristiques mécaniques des poutres en lamellé-collé artisanal avec des aboutages en biais (poutres 1 à 6)

Poutre	MOE (GPa)	MOR (MPa)	Charge critique en flambement (kN)
1	21,6	83,9	223
2	16,9	44,4	174
3	22,4	90,3	231
4	20,5	59,2	211
5	19,3	84,3	199
6	16,9	65,0	174
Moyenne	19,6	71,9	202
RSD (%)	10,9	22,9	11,0

Tab. 2 : Caractéristiques mécaniques des poutres en lamellé-collé industriel avec des aboutages droits (poutres 7 à 10)

Poutre	MOE (GPa)	MOR (MPa)	Charge critique en flambement (kN)
7	17,8	65,6	183
8	18,0	76,6	186
9	18,9	79,3	195
10	14,6	58,8	151
Moyenne	17,3	70,0	179
RSD (%)	9,4	11,8	9,3

## Remerciements

Je remercie François Vivier, architecte naval investi dans le projet du Miguel Caldentey, qui a répondu à mes nombreuses questions.

## Références

Bertino L, Marchaison R (2011) Caractérisation des pièces aboutées pour le domaine de la construction, Rapport de projet de fin d'études, Université de Lorraine/ENSTIB, 54 p.

De Chapman F-H (1871) Traité de la construction des vaisseaux, Librairie Bachelier, Paris, 219 p.

Lemagorou L (2018) Manuel du bois lamellé - Adaptation française du Glulam HandBook, CODIFAB/Swedish Wood/SNBL/ACERBOIS (vol 2). <https://handbook.glulam.org/>

Wolfer M (1991) Mâts et gréements : la connaissance des problèmes de la mâturation et du gréement, Loisirs Nautiques, HS n°26, 298 p.



## Liste des participants

Hamza ABBASSI	hamza.abbassi@unilim.fr	Labcis, Limoges
Alaa AL FAYE	alaa.al-fay@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Roman ALBERNHE	roman.albernhe@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Tancrede ALMÉRAS	tancrede.almeras@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Tania ALVAREZ	tania.alvarez-diaz@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Margot ARNAUD	margot.arnaud@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Olivier ARNOULD	olivier.arnould@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Vincent ARNOULD	vincent.arnould2@gmail.com	I. Pascal, Clermont-Fd
Aurelie AUTISSIER	aurelie.autissier@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Florence AVIAT	florenceaviat@gmail.com	YouR Research Bio scientific, La Landreau
Eric BADEL	eric.badel@inrae.fr	PIAF, Clermont-Fd
Sana BAKLOUTI	sana.Baklouti@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Sandrine BARDET	sandrine.bardet@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Florian BAYLE	Florian.BAYLE@doctorant.uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Christophe BELLONCLE	christophe.belloncle@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Nassim BELMOKHTAR	nassim.belmokhtar@inrae.fr	BioForA, Orléans
Thibault BENISTAND	thibault.benistand@esb-campus.fr	ESB, Nantes
Arnaud BESSERER	arnaud.besserer@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Pierre BIGAY	pierre3897@gmail.com	I2M, Bordeaux
Pierre BLANCHET	Pierre.Blanchet@sbf.ulaval.ca	SBF, Quebec (CA)
Laurent BLÉRON	laurent.bleron@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Hugo BLYTH	hugo.blyth1@gmail.com	UM-msb, Montpellier

Juliette BOIVIN	juliette.boivin@ensam.eu	Labomap, Cluny
Nathalie BOIZOT	nathalie.boizot@inrae.fr	BioForA, Orléans
Emilie BOSSANNE	emilie.bossanne@fcba.fr	FCBA, Bordeaux
Julie BOSSU	julie.bossu@cnsr.fr	Ecofog, Kourou (GF)
Romain BOUDAREL	romain.boudarel@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Clément BOUDAUD	clement.boudaud@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Sarra BOUHLEL	sarra.bouhleb@u-bordeaux.fr	I2M, Bordeaux
Matteo BOURCHANIN	matteo.bourchanin@u-psud.fr	UM-msb, Montpellier
Alexis BOUTIN	alexis.boutin@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Elisa Jeanne BRANCHARD	elisa-jeanne.branchard@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Loïc BRANCHERIAU	loic.brancheriau@cirad.fr	Biowoob, Montpellier
Iris BRÉMAUD	iris.bremaud@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Joseph BRIHIEZ	jbrihiez@gmail.com	MNHM, Paris
Geraldine BRUN	geraldine.brun@gu.se	institution för kulturvård, Mariestad (SE)
San BULINGUI-BU-NGUMBE	sans.bulingui-bu-ngumbe@univ-lorraine.fr	Lermab, Longwy
Mathilde CAILLER	mathilde.cailler31@gmail.com	Master Sciences du Bois - Recherche d'emploi, Montpellier
Kévin CANDELIER	kevin.candelier@cirad.fr	Biowoob, Montpellier
Isabelle CAPRON	isabelle.capron@inrae.fr	BIA, Nantes
Laurent CASTETS	lcastets@gascognebois.com	Gascogne Bois, Bordeaux
Thomas CATTEROU	thomas.catterou@fcba.fr	FCBA, Bordeaux
Matisse CHAMBRY	matisse.chambry@etu.umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Myriam CHAPLAIN	myriam.chaplain@u-bordeaux.fr	I2M, Bordeaux
Bertrand CHARRIER	bertrand.charrier@univ-pau.fr	Iprem, Pau
Maud CHEMIN	maud.chemin@fcba.fr	FCBA, Nantes

Elie CHEYNEL	elie.cheynel@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Antoine CHILLET	antoine.chillet@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Yi Hien CHIN	yi_hien.chin@uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Bruno CLAIR	bruno.clair@cnrs.fr	LMGC, Montpellier
Fabien CLEMENT	fabien.clement@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Thierry CONSTANT	thierry.constant@inrae.fr	Silva, Nancy
Paul CORBINEAU	paul.corbineau@wanadoo.fr	0, Nantes
Silva CORDEIRO	silvcordeiro2019@gmail.com	Labomap, Cluny
Pierre-Antoine CORDY	PCO@NEY.partners	Ney & Partners Wow, Namur (B)
Guy COSTA	guy.costa@unilim.fr	Labcis, Limoges
Jean-Luc COUREAU	jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr	I2M, Bordeaux
Hugo CURIAL	Hugo.Curial@ensam.eu	Labomap, Cluny
Rémi CURTI	remi.curti@iut-tarbes.fr	ICA, Tarbes
Marie DALEMAT	marie.dalemat@saint-gobain.com	Saint-Gobain,
Christine DELEUZE	christine.deleuze@onf.fr	ONF, Maisons- Alfort
Netih DEMBA	netih.demba@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Louis DENAUD	louis.denaud@ensam.eu	Labomap, Cluny
Luigiano DUARTE	luigiano.duarte.1@ulaval.ca	Univ. Laval, Quebec (CA)
Frédéric DUBOIS	frederic.dubois@unilim.fr	GC2D, Egletons
Serge EKOMY ANGO	ekomyango@yahoo.fr	LaReVa Bois, Libreville (GA)
Ley Fleury ELLA NKOGO	ley-fleury.ella-nkogo@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Anis EL-OUADIE	anis.el-ouadie@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Arnauld ENGONGA EDZANG	arnauld.engonga-edzang@inrae.fr	LaReVa Bois, Libreville (GA)
Florent EYMA	florent.eyma@iut-tarbes.fr	ICA, Tarbes
Martin FONTAINE	martin.fontaine@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Meriem FOURNIER	meriem.fournier@inrae.fr	Silva, Nancy
Salomé FOURNIER	salome.fournier@onf.fr	ONF, Dole
Victor FRECHARD	victor.frechard@nancy.archi.fr	Lermab, Nancy

Emmanuel FREDON	emmanuel.fredon@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Zeynep GALITEKIN	galitekinzeynep@outlook.com	LIMBHA, Nantes
Clément GENTY	clement.genty@groupe-vicard.com	Lampa, Angers
Stéphane GIRARDON	Stephane.Girardon@ensam.eu	Labomap, Cluny
Coline GIUSTINIANI	coline.giustiniani5@etu.univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Dalmer GOMEZ	dalmer.gomez@enpc.fr	ENPC, Marne-la-Vallée
Lucie GOURICHON	lucie.gourichon@inrae.fr	PIAF, Clermont-Fd
Quentin GOUTY	quentin.gouty@univ-pau.fr	Iprem, Pau
Guilhem GREFFIER	guilhem.greffier@iut-tarbes.fr	ICA, Tarbes
Maxence GRENOT	maxence.grenot@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Joseph GRIL	joseph.gril@cnrs.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Elliott GELZEC	elliott.gzc@outlook.fr	LIMBHA, Nantes
Daniel GUIBAL	Daniel.guibal@cirad.fr	Biowoeb, Montpellier
Marie GUILLET	marie.guillet02@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Alban GUYOT	alban.guyot@cirad.fr	Biowoeb, Montpellier
Hamzah HAJJAR	Hamzah.Hajjar@ec-nantes.fr	LIMBHA, Nantes
Claudia HALTER	claudia.halter@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Jean-Marc HENIN	j.henin@cra.wallonie.be	LTB, Gembloux (BE)
Charlie HUREAU	charlie.hureau@cnrs.fr	C2RMF, Paris
Mark IRLE	Mark.Irle@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Joël Eméric ITOMBA BAYIKA	bayikajoel@gmail.com	EPM, Franceville (GA)
Chaimaa JAAFARI	chaimaa.jaafari@uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Delphine JULLIEN	Delphine.Jullien@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Cyril KACHOUH	cyril.kachouh@ensam.eu	Labomap, Cluny
Assira KERALTA	assira.keralta@cermav.cnrs.fr	Cermav, Grenoble
Ahmed KOUBAA	Ahmed.Koubaa@uqat.ca	UQAT, Ruyn-Noranda (CA)
Clément LACOSTE	clement.lacoste@mines-ales.fr	PCH, Alès

Helene LAGARDE	helene.lagarde@esb.fr	LIMBHA, Nantes
Tom LAMBRE	tom.lambre@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Francesca LANATA	francesca.lanata@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Veronic LANDRY	veronic.landry@sbf.ulaval.ca	Univ. Laval, Quebec (CA)
Paul LANGLOIS	paul.langlois3@etu.univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Bertrand LARATTE	bertrand.laratte@gmail.com	Univ. Laval, Quebec (CA)
Loic LATORRE	llatorre@univ-pau.fr	Iprem, Pau
Juliette LAURENT	juliette.laurent02@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Anne LAVALETTE	anne.lavalette@alt-rd.com	Alt-RD, Bègles
Floriane LAVOREL	floriane.lavorel@armor-panneaux.com	Armor Panneaux, Val D'oust
Flore LEBRETON	flore.lebreton@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Mathis LECOQ	mathis.lecoq@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Niels LEFEUVRE	nils.lefeuvre@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Marc LEFEVRE	mlefevre21462@hotmail.fr	Iron Rabbits, Nivillac
Yannig LEPECQ	yannig.lepecq@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Boubakar LIKIBY	likibyboubakar@gmail.com	MPM, Yaounde (CA)
Fleur LONGUETAUD	fleur.longuetaud@inrae.fr	Silva, Nancy
Nolann LUCAS	nolann.lucas@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Stephano MAFFI	stefano.maffi@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Atteb MAHAMAT SALEH CHEIKHADINE	atteib.mahamat.saleh.cheikhadine@univ- poitiers.fr	Pprime, Poitiers
Fanny MALATIER	fanny.malatier@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Caroline MARC	caroline.marc@ensam.eu	Labomap, Cluny
Thibault MARCEL- MATHEY	thibaud.marcel-mathey@ensam.eu	Labomap, Cluny
Bertrand MARCON	Bertrand.marcon@ensam.eu	Labomap, Cluny
Benoit MARTIN	b.martin@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Corinne MARTIN	corinne.martin@agroparistech.fr	Silva, Nancy
Camille MARTINET	camille.martinet01@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier



Elorry MASSELIN	elorrymass@live.fr	UM-msb, Montpellier
Florence MATHIEU	mathieu.florence@hotmail.fr	Estinova Conseil, Estivareilles
Henri MEYO DEGBOEVI	henrimeyo@gmail.com	ENSET, Libreville (GA)
Franck MICHAUD	franck.michaud@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Marlain Stevy MIKALA MOUENDOU	marlain.mikala-mouendou@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Louis MILHE	louismilhe@gmail.com	Labomap, Cluny
Leonie MOLARO-MAQUA	leonie.molaro-maqua@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Mathilde MONACHON	mathilde.monachon@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Cédric MONTERO	cedric.montero@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Charnelle MOUKETOU BEUMO	charnelleiris@gmail.com	Biwooeb, Montpellier
Lie Regis MOUMBINA DINDZAMBOT	regismoumbina@hotmail.com	ENEF, Libreville (GA)
Rostand MOUTOU PITTI	rostand.moutou_pitti@uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Carlo MUSCO DE CAIRES	carlo.musco-de-caires@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Linda NASRI	linda.nasri@iut-tarbes.fr	ICA, Tarbes
Junior NGANKO	juniornganko@gmail.com	INP HB, Yamoussoukro (CI)
Loic Chrislin NGUEDJIO	loic.nguedjio@doctorant.uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd (CM)
Estelle NKENE MZUI	esthernkenemezui@gmail.com	Biwooeb, Montpellier
Epiphanie NOUEMSI SOUBGUI	nouemsisepiphanie@gmail.com	I. Pascal, Clermont-Fd
Estelle NOYER	noyer.estelle@gmail.com	CzechGlobe, Brno (CZ)
Apolline OSWALD	apolline.oswald@xylofutur.fr	Xylofutur, Bordeaux
Nour El Hoda OUEIDAT	nour-el-hoda.oueidat@u-bordeaux.fr	I2M, Bordeaux
Axel PEIGNON	peignon@insa-toulouse.fr	ICA, Toulouse
Marianne PERRIN	marianne.perrin@iut-tarbes.fr	ICA, Tarbes

Anélie PÉTRISSANS	anelie.petrisans@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Carola PHUNG	carola.guyot@u-bordeaux.fr	I2M, Bordeaux
Gilles PILATE	gilles.pilate@inrae.fr	BioForA, Orléans
Martin PILON	martin.pilon@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Vincent PLACET	vincent.placet@univ-fcomte.fr	Femto-st, Besançon
Octavian POP	ion-octavian.pop@unilim.fr	GC2D, Egletons
Guillaume POT	guillaume.pot@ensam.eu	I. Pascal, Clermont-Fd
Kambiz POURTAHMASI	pourtahmasi@ut.ac.ir	Univ. Teheran, (IR)
Eva QUEHEILLE	eva.queheille@univ-eiffel.fr	GPEM, Bouguenais
Leane QUERNEC	l.quernecc@fibois-paca.fr	FIBOIS Sud PACA, Gardanne
Lara RAMADAN	lara.ramadan@esb-campus.fr	LIMBHA, Nantes
Tahiana RAMANANANTOANDRO	ramananantoandro@gmail.com	ESSA, Tananarive (MG)
Johan RAMAUX	johan.ramaux@univ-lorraine.fr	Lermab / LRGP, Nancy
Paul RAMBAUD	arbre.a.la.maison@gmail.com	Iron Rabbits, Nivillac
Ylona RAMOND	ylona.ramond@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Tiavina RANDRIAMBININTSOA	randriambinintsoat@gmail.com	ESSA, Tananarive (MG)
Valentine REMOND	valentine.remond2002@gmail.com	I. Pascal, Clermont-Fd
Romain RÉMOND	romain.remond@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Jeremie RENAUD	jeremie.renaud@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Aniza RIA	ria.aniza@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Baptiste RODRIGUES	baptiste.rodriguez@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
David RODRIGUES- SOARES	soares.d@grenoble.archi.fr	ENSAG-AE&CC, Grenoble
Coline ROIRON	coline.roiron@saint-gobain.com	Saint-Gobain,
Lucas ROJAS	lucas.rojas@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Christophe ROSE	christophe.rose@inrae.fr	Silva, Nancy

Eric ROSENKRANTZ	eric.rosenkrantz@umontpellier.fr	IES, Montpellier
Julien RUELLE	julien.ruelle@inrae.fr	Silva, Nancy
Nima SAEDLOU	xylotree@gmail.com	Xylotree, Saintes
Nicolas SAUVAT	nicolas.sauvat@uca.fr	I. Pascal, Clermont-Fd
Youness SENHAJI	youness.senhaji@univ-pau.fr	Iprem, Pau
James SEUKAP	james.seukap-pancha@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Dimitri SIBE	d.sibe@lamecol-dl.fr	I2M, Bordeaux
Yannick SIEFFERT	yannick.sieffert@3sr-grenoble.fr	3SR, Grenoble
Delin SOH MBOU	Delin.SOH_MBOU@ensam.eu	Labomap, Cluny
Edanur SOLHAN	solhanedanur@gmail.com	LIMBHA, Nantes
Antoine STEPHAN	antoine.stephan@univ-lorraine.fr	Lermab, Epinal
Amelie STEPHANN	amelie.stephann@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Pierre SUDRE	pierre.sudre@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Lola-Della TALAVERA	lola-della.talavera@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Rémi TEISSIER DU CROS	rteissierducros@taransaud.com	Taransaud, Cognac
Marie-France THÉVENON	marie-france.thevenon@cirad.fr	Biowoob, Montpellier
Bernard THIBAUT	bernard.thibaut@umontpellier.fr	LMGC, Montpellier
Mathieu THIRY	mathieu.thiry44@gmail.com	En recherche d'emploi, St Philbert de Grand Lieu
Killian TOULGOAT	killian.toulgoat@umontpellier.fr	IES, Montpellier
Orlane TOUZET	orlane.touzet@inrae.fr	BioForA, Orléans
Camille TRAMOND	camille.tramond@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Enzo TREMEAU	enzo.tremeau@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Gaëlle VANARD	gaelle.vanard@airbus.com	ZETCA (Airbus Atlantic), Meaulte
Anne VENTURA	anne.ventura@univ-eiffel.fr	GPEM, Bouguenais
Romain VIALA	romain.viala@univ-fcomte.fr	Femto-st, Besançon

Marcia VIDAL	marcia.vidal@ademe.fr	ADEME, Sophia Antipolis
Joffrey VIGUIER	Joffrey.viguiier@ensam.eu	Labomap, Cluny
Marc VINCENT	marc.vincent@xylofutur.fr	Xylofutur, Bordeaux
Pierre VINCHELIN	pierre.vinchelin@univ-lorraine.fr	Lermab, Nancy
Romain WEIGEL	weigel.romain@gmail.com	LIMBHA, Nantes
Ridwan YAHYA	ridwanyahya@unib.ac.id	Fac. Agriculture, Kota Bengkulu (ID)
Leo ZANARDI	leo.zanardi@etu.umontpellier.fr	UM-msb, Montpellier
Antoine ZUNINO	antoine.zunino@fcba.fr	FCBA, Bordeaux

## Liste des participants « entreprises »

AUD	Arbre à la maison	arbre.a.la.maison@gmail.com
BAUDRAND	Fibois PDL	mbaudrand@fibois-paysdelaloire.fr
BENISTAND	ECSB	ecs.tb@gmail.com
BONOMELLI	Swiss Krono SAS	fabrice.bonomelli@swisskrono.com
BORDEBEURE	Ademe	sylvain.bordebeure@ademe.fr
BORDEBEURE	Ademe	sylvain.bordebeure@ademe.fr
BOSSANNE	FCBA	emilie.bossanne@fcba.fr
BOUBAKAR	Mission de Promotion des Matériaux Locaux	mipromalosecretaria@gmail.com
BOURGET	France Poutres	arnaud.bourget@france-poutres.com
CASTANET	Piveteau Bois	hugo.castanet@piveteau.com
CASTET	Gascognes	lcastets@gascognebois.com
CHARBONNEAU	ESB	sylvie.charbonneau@esb-campus.fr
CHARRIER	Minco SAS	eric.charrier@minco.fr
CHEMIN	FCBA	maud.chemin@fcba.fr
COANON	Rothoblass	pierreolivier.coanon@rothoblaas.com
DALEMAT	Saint Gobain	marie.dalemat@saint-gobain.com
DE NAVACELLE	BATIPAC	g.denavacelle@batipac.pro
DELAGE	Simpson Strong-Tie	bdelage@strongtie.com
DELVART	Piveteau Bois	aurore.delvart@piveteau.com
DEMANET	Melinea	a.demanet@melinea-innovation.fr
EHONO	Renovpal	f.ehono@renovpal.fr
GERARD	Piveteau Bois	ugo.gerard@piveteau.com
HONORE	Simpson Strong-Tie	nhonore@strongtie.com
KETELS	Novabuild	hanna.ketels@novabuild.fr
LAGARDE	MROD	h.lagarde@mrod.fr
LAMBERT	Groupe HSL	stephane.lambert@groupehsl.fr
LAMPIN	Fibois PDL	clampin@fibois-paysdelaloire.fr
LANCELEVEE	Rothoblass	bastien.lancelevee@rothoblaas.com
LAVENTURE	Ouvéó	t.laventure@ouveo-menuiseries.fr
LE DEVEHAT	Ouvéó	m.ledevehat@ouveo-menuiseries.fr
LEREDE	L5A	l5a.concept.bois@gmail.com
LESEUX	Piveteau Bois	simon.leseux@piveteau.com

LOUE	Bénéteau	m.loue@beneteau-group.com
MAINARD	INOE	f.mainard@inoe.fr
MASSELIN	Xylofutur	elorry.masselin@xylofutur.fr
MELEUC	Ouvéó	r.meleuc@ouveo-menuiseries.fr
MOISAN	Ademe	sandy.moisan@ademe.fr
MONNET	Wigwam	francois@wigwam-conseil.com
OSWALD	Xylofutur	apolline.oswald@xylofutur.fr
PETIOT	Fibois PDL	ypetiot@fibois-paysdelaloire.fr
POUVREAU	Isonat	quentin.pouvreau@saint-gobain.com
QUERNEC	Fibois PACA	l.quer nec@fibois-paca.fr
RAMBAUD	Arbre à la maison	arbre.a.la.maison@gmail.com
RENAUD	Les Genêts d'Or	louis.renaud@lesgenetsdor.org
RIALLAND	Fibois PDL	srialland@fibois-paysdelaloire.fr
RICHEL Y	Florentaise	emmanuelle.richely@florentaise.com
RIO	Ouvéó	py.rio@ouveo-menuiseries.fr
ROIRON	Saint Gobain	coline.roiron@saint-gobain.com
ROUSSEY	Wigwam	claire@wigwam-conseil.com
TAVIAUX	Rothoblass	michael.taviaux@rothoblaas.com
TEISSIER DU CROS	Taransaud	rteissierducros@taransaud.com
TOUSSAINT	ISB	pascal.toussaint@groupe-isb.fr
VACHER	Fibois PDL	pvacher@fibois-paysdelaloire.fr
VANARD	Airbus	gaelle.vanard@airbus.com
VIDAL	Ademe	marcia.vidal@ademe.fr
VINCENT	Xylofutur	marc.vincent@xylofutur.fr