



HAL
open science

Actes des 12èmes Journées Scientifiques du GDR Sciences du Bois

Eric Badel, Joseph Gril, Guy Costa

► **To cite this version:**

Eric Badel, Joseph Gril, Guy Costa. Actes des 12èmes Journées Scientifiques du GDR Sciences du Bois. 12èmes Journées Scientifiques du GDR Sciences du Bois. Limoges. 20-24 Novembre, 2024. hal-04398531

HAL Id: hal-04398531

<https://hal.inrae.fr/hal-04398531v1>

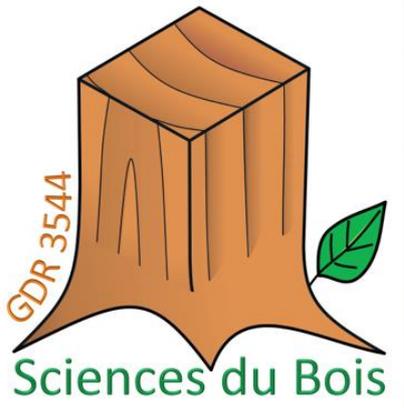
Submitted on 16 Jan 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



12e Journées Scientifiques
Limoges 22-24 novembre 2023

GDR *La durabilité, c'est tout
à la fois notre passé et
notre futur*
SCIENCES DU BOIS

LABCiS UM 12722
Laboratoire des Agroressources, Biomolécules
et Chimie pour l'Innovation en Santé



GDR Groupement
de recherche
Sciences du bois

Actes

Coordination et édition: Eric Badel (PIAF), Joseph Gril (Institut
Pascal), Guy Costa (LABCiS)

Table des matières

| | |
|-------------------------------|-----|
| Éditorial | 3 |
| Comités | 4 |
| Soutiens et sponsors | 5 |
| Programme des Journées | 7 |
| Groupes de travail | 10 |
| Visites | 16 |
| Présentations orales invitées | 17 |
| Posters / présentations flash | 41 |
| Liste des participants | 358 |

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 2023, Limoges nous accueille en organisant cette 12^{ème} édition des Journées Scientifique Annuelles du GDR 3544 Sciences du Bois.

La thématique des journées « la durabilité » est logiquement articulée autour des recherches de la communauté Limougeaude. Ont été abordés en particulier, la durabilité naturelle des bois, la durabilité que nous pouvons lui conférer par divers traitements, la résilience temporelle des bois archéologiques et la durabilité structurelle des ouvrages du génie civil.

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). A noter que les actes de toutes ces manifestations sont accessibles librement sous HAL. (<https://hal.science/>)

En 2023, cette manifestation est organisée à Limoges par des acteurs du site scientifique limougeaud et en particulier le LABCiS. La participation à ces journées a été de l'ordre de plus de 170 personnes avec une vingtaine de participants étrangers.

Ces journées ont consisté comme les années précédentes, en des exposés invités, suivis de présentations éclair appuyées par plus de 70 posters. Des réunions d'une dizaine de groupes de travail à l'initiative des participants se sont déroulées, ainsi que la possibilité de découverte des activités des laboratoires du campus hôte et d'entreprises et lieux culturels locaux, toujours sur le thème du bois, bien sûr ! L'innovation 2023 a été l'organisation d'une session table ronde passionnante, animée par une collègue du Pôle de Compétitivité Xylofutur, sur les attentes de la filière et les verrous scientifiques à lever.

Le GDR 3544 « Sciences du Bois » remercie particulièrement le comité local d'organisation de Limoges 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 relu l'ensemble des 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, Joseph GRIL et Guy COSTA

Comités

Comité d'organisation local

- Nicolas ANGELLIER, GC2D, Univ. Limoges, Limoges
- Laure BREMAUD, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Guy COSTA, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Didier DELOURME, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Frédéric DUBOIS, GC2D, Univ. Limoges, Limoges
- Christelle GADY, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Sabine LHERNOULD, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Stéphanie LHEZ (Chimie), LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Octavian POP, GC2D, Univ. Limoges, Limoges
- Nicolas VILLANDIER, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges
- Rachida ZERROUKI, LABCiS, Univ. Limoges, Limoges

Comité scientifique

- Tancrède ALMERAS (Biomécanique), LMGC, CNRS, Montpellier
- Olivier ARNOULD (Mécanique), LMGC, Univ. Montpellier, Montpellier
- Eric BADEL (Hydraulique, Biomécanique), PIAF, INRAE, Clermont-Ferrand
- Loic 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
- Thiery 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
- Ludovic MARTIN (Biologie), PIAF, INRAE, Celrmont-Ferrand
- Emmanuel MAURIN (Culture, Patrimoine), LRMH, Champ sur Marne
- Rostand MOUTOU PITTI (Genie Civil), Institut Pascal, UCA, Clermont Ferrand
- Anélie PETRISSANS (Chimie_Procédés), LERMAB, Univ. Lorraine, Nancy
- Gilles PILATE (Biologie), BIOFORA, INRAE, Orléans
- Guillaume POT (Mécanique), LABOMAP, ENSAM, Cluny
- Romain REMOND (Transferts thermiques), LERMAB, Univ. Lorraine, Epinal
- Frédéric ROUGER (Mécanique, Génie Civil), FCBA, Bordeaux
- Julien RUELLE (Biomécanique) SILVA, INRAE, Nancy
- Nicolas SAUVAT (Genie 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



Laboratoire LABCiS



Université de Limoges



Limoges Métropole



AgroParisTech



Ministère de la Culture



INRAE



CNRS



Région Nouvelle Aquitaine



Entreprise de construction GUILLAUMIE



Cartonnerie LACAUX



PANNEAUX DE CORREZE



COOPERATIVE FORESTIERE
BOURGOGNE LIMOUSIN



Association HETRE EN FORET



Institut de Recherche de Limoges OMEGA
HEALTH

Programme des Journées



Mercredi 22 novembre

07h30 Accueil – café Salle du Médialab campus des Jacobins 88 rue du Pont St Martial

08h15 Discours d’ouverture

08:15 – Eric BADEL

08:30 – Fanny DUBAN, pour la Métropole de Limoges

08:45 – Bernard LAZARINI, pour la Région Nouvelle Aquitaine

Session 1 Durabilité naturelle

09:00 – Marie France THEVENON

09:30 – Christian BRETON

10:00 – Flashtalk

PAUSE CAFÉ

11:00 – Session poster –A

12:30-14:00 –Pause Déjeuner

Session 2 Durabilité conférée

14:00 – Joris Van ACKER

14:30 – Sandrine BOUQUILLON

15:00 – Flashtalk

PAUSE CAFÉ

16:00 – Session poster –B

17:00 – Groupes de Travail

- GT XYLOGENESE (Salle OKAI 1er étage)
- GT RUPTURE (Salle de réunion Rez-de-chaussée)
- GT XYLOMAT (Salle ITO 1er étage)
- GT IMAGERIE (Salle Halle d’accueil Rez-de-chaussée)
- GT ECOLOGIE DU BOIS (Salle de cinéma Rez-de-chaussée)

19h30 Réunion bureau, comité de pilotage



Jeudi 23 novembre

8:00 – Groupes de Travail

- GT CONSTRUCTION (Halle d'accueil Rez-de-chaussée)
- GT USINAGE (Salle OKAI 1er étage)
- GT PATRIMOINE (Salle ITO 1er étage)
- GT NIRS (Salle de cinéma Rez-de-chaussée)

Session 3 Résilience temporelle

09:00 – Christophe CORONA

09:30 – François BLONDEL

10:00 – Flashtalk

PAUSE CAFÉ

11:00 – Session poster –C

12:30-14:00 –Pause Déjeuner

13:30 Visites d'entreprises

VISITE 1 -Ussel -Départ 13:30

- Coopérative Forestière CFBL
- Panneau de Corrèze

VISITE 2 -Limoges -Départ 13:30

- Entreprise de construction Guillaumle
- Cartonnerie Lacaux

VISITE 3 -Nedde –Départ 13:30

- Hêtre en Forêt

19h30 *Diner de gala – Le Lanaud*



Vendredi 24 novembre

Session 4 Durabilité structurelle

08:30 – Conférence plénière

- Romain RÉMOND
- Arnaud BESSERER

PAUSE CAFÉ

10:00 – **Table Ronde** animée par Apolline OSWALD (Xylofutur)

12:00 Pause Déjeuner

13 :00 **Remise des Prix** « Meilleurs Posters »

13:45 **Clôture** des journées Scientifiques du GDR 3544

Groupes de travail

GT XYLOGENESE -Annabelle DEJARDIN, Thierry CONSTANT

- Horaires, Mercredi 22/11 17h00-19h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, OKAI (15 places) 1er étage

GT RUPTURE -Myriam CHAPLAIN, Rostand MOUTOU-PITTI, Frédéric DUBOIS

- Horaires, Mercredi 22/11 17h00-19h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, Salle de réunion (30 places) Rez-de-chaussée

GT XYLOMAT -Bertrand CHARRIER

- Horaires, Mercredi 22/11 17h00-19h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, ITTO (20 places) 1er étage

GT IMAGERIE -Evelyne TOUSSAINT, Guy COSTA

- Horaires, Mercredi 22/11 17h00-19h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, Hall d'accueil (25 places) Rez-de-chaussée

GT ECOLOGIE DU BOIS -Yannick SIEFFERT, David RODRIGUES-SOARES, Ivan MAZEL

- Horaires, Mercredi 22/11 17h00-19h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, Salle de cinéma (200 places) Rez-de-chaussée

GT CONSTRUCTION -Nicolas SAUVAT, Cédric MONTERO

- Horaires, Jeudi 23/11 08h00-09h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, Salle de cinéma (200 places) Rez-de-chaussée

GT PATRIMOINE -Delphine JULLIEN, Emmanuel MAURIN

- Horaires, Jeudi 23/11 08h00-09h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, ITTO (20 places) 1er étage

GT NIRS -Gilles CHAIX, Nassim BELMOKHTAR

- Horaires, Jeudi 23/11 08h00-09h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, Hall d'accueil (30 places) Rez-de-chaussée

GT USINAGE -Louis DENAUD, Florent EYMA

- Horaires, Jeudi 23/11 08h00-09h00
- Lieu, Campus des Jacobins, 88 rue du Pont Saint Martial 87000 Limoges
- Salle, OKAI (15 places) 1er étage



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>

Dans le thème général de la durabilité du colloque de cette année, le groupe de travail Ecologie du bois abordera la durabilité de la mise en œuvre et de l'assemblage des matériaux dans une construction en bois. Il s'agit de comprendre en quoi la durabilité peut être permise, au-delà d'une durabilité naturelle propre à une essence ou à des traitements chimiques conférés, par l'intelligence de la mise en œuvre sur chantier et de l'assemblage pertinent des matériaux de construction, en bois et éventuellement associé à d'autres matières.

Géraldine Brun (ingénieur et charpentière bois, et doctorante au Laboratoire de l'artisanat du Département de Conservation de l'Université de Göteborg) traitera de la durabilité des bardages bois traditionnels par une approche comparative de bâti suédois et français, et questionnera ainsi notre conception moderne de la durabilité.

Samuel Nemoz (enseignant à l'École nationale supérieure d'architecture de Marseille et ingénieur bois en bureau d'études) analysera le niveau de durabilité des solutions de mise en œuvre des poteaux bois en extérieurs, et particulièrement leurs ancrages au sol, à partir de cas tirés de sa pratique professionnelle.



Usinage bois

Animation :

Florent Eyma <florent.eyma@iut-tarbes.fr>

Louis Denaud <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.

Plus d'informations :

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



Xylogénèse

Animation :

Annabelle Dejardin, annabelle.dejardin@inrae.fr

Thierry Constant, 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, et Xylo2022 en juillet 2022 à Nancy. L'édition 2022 du GDR Sciences du Bois a été l'occasion de d'évoquer le format de la prochaine édition de ces journées, et d'échanger sur des projets qui démarrent, ou qui sont en gestation.



Rupture

Animation

Rostand Moutou Pitti, rostand.moutou_pitti@uca.fr

Myriam Chaplain, myriam.chaplain@u-bordeaux.fr

Frédéric Dubois, 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>



Imagerie

Animation

Evelyne Toussaint, evelyne.toussaint@uca.fr

Guy Costa, 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>



Bois de construction

Animation

Nicolas Sauvat, nicolas.sauvat@unilim.fr

Eric Fournely, eric.fournely@uca.fr

Ce groupe de travail sera consacré à l'approche « matériau », avec une présentation de l'activité du TC 124 par Frédéric Rouger qui le préside. Nous aborderons ensuite les besoins de caractérisation des bois sous-employés dans les constructions, qu'ils soient d'origine géographique proche de leurs usages (bois locaux) et l'essor de leurs certifications potentielles, ou encore en bois de feuillus, hors gabarits industriels pour les transformateurs.

Plus d'informations :

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



Patrimoine

Animation :

Delphine Jullien, delphine.jullien@umontpellier.fr

Emmanuel Maurin, emmanuel.maurin@culture.gouv.fr

Le Groupe de Travail Patrimoine est un lieu d'échanges sur les trois thématiques traditionnelles du patrimoine à savoir : la connaissance du matériau, le diagnostic, les méthodes et techniques en conservation-restauration, et sur les différentes échelles d'étude : les matériaux, les assemblages et les structures bâties.

Une petite série d'interventions a présenté quelques exemples d'études en cours, ainsi que les dernières actualités du groupe Bois de la SFIIC (Section Française de l'Institut International de Conservation). Les scientifiques, restaurateurs, conservateurs, artisans, intéressés par ces échanges ont été vivement conviés à participer à ce groupe de Travail.



Xylomat

Animation :

Bertrand Charrier, bertrand.charrier@univ-pau.fr

Le plateau Xylomat apporte son expérience pour des projets R&D, de développement produits et de prestations diverses liés aux matériaux bio-sourcés.

Plus d'informations :

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



NIRS & Bois

Animation :

Gilles CHAIX, gilles.chaix@cirad.fr

Nassim BELMOKHTAR, 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...).

Les actions proposées sont :

1. Identifier les compétences des différents laboratoires partenaires du GDR et élargir à d'autres laboratoires français et hors de France
2. Partage d'expérience aussi bien sur des aspects méthodologiques et expérimentaux (équipements, préparation et conservation des échantillons) que sur les volets analytiques (logiciels, outils et méthodes statistiques de traitement de données).
3. Susciter des actions communes, des projets de recherches

Visites

VISITE 1 -Ussel –

Départ 13:30

- Coopérative Forestière CFBL
- Panneau de Corrèze

VISITE 2 -Limoges –

Départ 13:30

- Entreprise de construction Guillaumie
- Cartonnerie Lacaux

VISITE 3 -Nedde –

Départ 13:30

- Hêtre en Forêt

Présentations orales invitées



Session 1 – Durabilité Naturelle du Bois (Mercredi 22/11 9h)

Marie-France THEVENON (CIRAD, Montpellier)

La durabilité naturelle : une donnée essentielle pour un bon usage du bois et de ses matériaux dérivés

Christian BRETON (BioForA, Orléans)

De la physiologie moléculaire à la génétique de la formation du bois de cœur



Session 2 – La Durabilité Conférée du bois (Mercredi 22/11 14h)

Joris VAN ACKER (WoodLab, Université de Gent, BE)

Enhancing resistance against decay and improve fire safety of engineered wood products

Sandrine BOUQUILLON (ICM, Université de Reims)

Synthèse de liquides ioniques biosourcés pour la dissolution de polymères issus de bois et l'extraction de composés bioactifs



Session 3 – La Résilience Temporelle (Jeudi 23/11 9h)

Francois BLONDEL (Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève)

Le bois archéologique face au réchauffement climatique : une durabilité mise à l'épreuve

Christophe CORONA (LECA, CNRS, Grenoble)

Les bois archéologiques : des archives climatiques à haute résolution spatio-temporelle, insuffisamment exploitées



Session 4 – Durabilité Structurale (Vendredi 24/11 8h30)

Romain RÉMOND (LERMab Epinal)

Gestion de l'humidité dans les bâtiments intégrant des matériaux biosourcés dans leur enveloppe

Arnaud BESSERER (LERMaB Nancy)

Les interactions bois-champignons : durabilité et soutenabilité des matériaux bois



Session 1 – Durabilité Naturelle du Bois (Mercredi 22/11 9h)

La durabilité naturelle du bois fait référence à la capacité intrinsèque du bois à résister à la dégradation causée par les insectes, les champignons et les intempéries. Différentes essences de bois présentent des niveaux variables de durabilité naturelle. Certains bois, tels que le cèdre rouge de l'Ouest et le teck, sont connus pour leur durabilité naturelle élevée. Ces essences contiennent des substances naturelles qui les rendent résistantes aux insectes et aux champignons, ce qui les rend appropriées pour une utilisation en extérieur sans traitement chimique supplémentaire. D'autres essences de bois, comme le pin, sont moins durables.

L'approche moléculaire de la durabilité naturelle du bois consiste à examiner les composants chimiques présents dans le bois qui contribuent à sa résistance naturelle aux insectes, aux champignons et aux intempéries. Le principal composant du bois est la cellulose, une macromolécule formée par l'enchaînement de molécules de glucose. La cellulose confère au bois sa rigidité et sa résistance mécanique. Cependant, elle n'est pas responsable de sa durabilité naturelle. Les composés chimiques responsables de la durabilité naturelle du bois sont généralement classés en deux catégories : **les extraits non volatils et les extractibles volatils**.

- Les extraits non volatils sont des composés chimiques solubles dans l'eau ou dans des solvants organiques. Ils comprennent des substances telles que les tanins, les flavonoïdes et les lignanes. Ces composés sont synthétisés par l'arbre pour se défendre contre les attaques d'insectes et de champignons. Ils agissent en inhibant la croissance des microorganismes ou en interférant avec leur métabolisme. Certains extraits non volatils, comme les tanins, sont également responsables de la résistance du bois aux rayons UV.
- Les extractibles volatils sont des composés chimiques volatils, libérés par le bois sous forme de vapeurs ou de gaz. Ils comprennent des substances telles que les terpènes et les phénols. Ces composés ont des propriétés antimicrobiennes et insecticides, ce qui contribue à la résistance du bois aux organismes nuisibles.

L'interaction complexe entre ces composés chimiques confère au bois sa durabilité naturelle. Cependant, il est important de noter que la durabilité du bois peut varier d'une essence à l'autre en raison de différences dans la composition chimique et la concentration de ces composés. L'approche moléculaire de la durabilité naturelle du bois permet de mieux comprendre les mécanismes de protection naturelle du bois et peut être utilisée pour développer des stratégies de préservation et de traitement du bois plus efficaces.



Marie-France THEVENON (Dr, HDR)

Biologiste de formation, après un DEA et un Doctorat de Sciences du Bois, une expérience de R&D au Critt Bois d'Epinal, j'ai rejoint le CIRAD en 2001. Dans l'unité de recherche « Biomasse, Bois, Energie et Bio-produits » (BioWooEB), je travaille sur la durabilité naturelle du bois et de ses dérivés (évaluation et compréhension) ainsi que sur la mise au point de moyens de protection du bois et des ouvrages. Je participe à plusieurs comités de normalisation français et Européens relevant de ces domaines.



Christian BRETON (CRHC, INRAE, UMR 0588 BioForA)

Après une maîtrise de Génétique, un DEA de Différenciation, Génétique et Immunologie et une thèse de Biotechnologie Végétale à l'université Lyon I, j'ai rejoint l'UMR BioForA (INRAE Val de Loire, Orléans) pour développer des recherches de physiologie moléculaire sur le développement des arbres. Les recherches que j'effectue depuis 1995 visent à mieux comprendre le développement des racines et la formation du bois de cœur pour intégrer de nouveaux marqueurs moléculaires spécifiques à ces deux processus de développement aux programmes d'amélioration en cours.

La durabilité naturelle : une donnée essentielle pour un bon usage du bois et de ses matériaux dérivés

THEVENON Marie-France

CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France

marie-france.thevenon@cirad.fr

Mots clefs : Durabilité naturelle, Organismes lignivores, Evaluation, Système normatif, Performance, Prédiction

Résumé de la communication

La durabilité sera abordée sous l'angle de la résistance inhérente d'une essence de bois ou d'un matériau dérivé du bois vis-à-vis des agents biologiques de dégradation du bois, c'est ce que l'on nomme communément la « durabilité naturelle ». En Europe, la manière d'évaluer cette durabilité naturelle est spécifiquement décrite dans la norme EN350 (2016), laquelle est une norme « cadre » stipulant les méthodes d'échantillonnage, renvoyant à des normes spécifiques d'essai et établissant les principes de classification. Le bois présente une variabilité plus ou moins marquée, intra et inter-individus, selon son âge, sa provenance géographique et la classification de la durabilité naturelle doit pouvoir traduire cette variabilité. En outre, cette norme contient des tableaux répertoriant les données de durabilité et d'imprégnabilité de nombreuses essences d'intérêt en Europe, tableaux que nombre d'acteurs de la filière bois et de la construction utilisent régulièrement.

En fonction de la durabilité d'un bois et de la classe d'emploi dans laquelle il doit être mis en œuvre, il pourra alors être décidé de l'utiliser tel quel ou de recourir à un moyen de protection adapté, afin d'avoir une durée de vie de l'ouvrage en adéquation avec nos attentes.

Ainsi, la durabilité naturelle est une donnée clé pour l'usage du bois et des matériaux à base de bois, en étant une donnée d'importance dans la prédiction de leurs performances dans un environnement donné.

A travers des exemples, nous aborderons différents aspects de l'évaluation de la durabilité naturelle (méthodes, utilisation de vieillissement ou non, variabilité des essences) et nous nous prononcerons sur le statut du « bois imputrescible » trop souvent galvaudé.

Références

EN 350 (2016) Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois, AFNOR.

De la physiologie moléculaire à la génétique de la formation du bois de cœur

BRETON Christian

INRAE - Val de Loire – Orléans, UMR 0588 BioForA, 45075 Orléans Cedex
christian.breton@inrae.fr

Mots clefs : duraminisation ; durabilité naturelle ; coloration ; marqueurs ; noyer noir ; robinier ; douglas

Résumé de la communication

Contrairement à la différenciation du xylème issu de l'activité du cambium aboutissant à la formation des cernes de croissance, la formation du bois de cœur ou duramen débute quant à elle, après un certain nombre d'années dans la partie centrale du tronc et se propage de manière centrifuge au cours des années. Chez les espèces d'arbre concernées, la formation du bois de cœur se traduit par le développement d'une coloration du bois associée à des possibilités de valorisation en menuiserie, ébénisterie ou construction du fait de sa coloration (noyer, merisier) ou de sa durabilité naturelle chez certaines essences (douglas, mélèze, robinier). De fait, la formation du duramen constitue la dernière étape de différenciation du bois. Cette étape peut avoir lieu de nombreuses années après la xylogénèse marquée par la synthèse de lignines, de cellulose mais aussi par la mort programmée des cellules vasculaires et des fibres. A ce niveau du tronc, seul un très faible nombre de cellules du bois sont encore vivantes (rayons parenchymateux). Quels sont les rôles de ces cellules dans les phénomènes de coloration et dans la durabilité naturelle du bois de cœur ? Même si des caractéristiques physiques (taille des vaisseaux, épaisseur des parois, densité) ou biochimiques (compositions et teneurs en lignines, celluloses, extractibles, sucres, sels minéraux) sont mises en place dans l'aubier, le métabolisme spécifique et finalement la mort de ces cellules jouent des rôles importants dans la formation du bois de cœur, sa coloration et sa durabilité.

C'est dans ce cadre que nous nous sommes intéressés à la transition aubier-bois de cœur et à l'accumulation d'extractibles spécifiques qui selon les espèces peuvent être reliés à la coloration voire à la durabilité naturelle des bois. Au cours de cet exposé et sur la base de nos travaux successifs sur le noyer, le douglas et le robinier, je montrerai que (bien que complexe et difficile d'accès) la duraminisation représente selon les espèces considérées autant de modèles d'étude qui gagneraient à être mieux compris et maîtrisés (Fig. 1). Outre des aspects de valorisation industrielle (production d'extraits fluorescents et antimicrobiens), les travaux que nous avons menés chez le noyer, le douglas et le robinier par des approches complémentaires de physiologie, de biochimie, de biologie moléculaire ouvrent maintenant des perspectives intéressantes de phénotypage et de génotypage à haut débit. Le développement de ces technologies à haut débit pourrait notamment se baser sur les connaissances acquises sur les extractibles, les mécanismes physiologiques spécifiquement mis en jeu et finalement les gènes impliqués dans ces transitions de couleur et de durabilité.

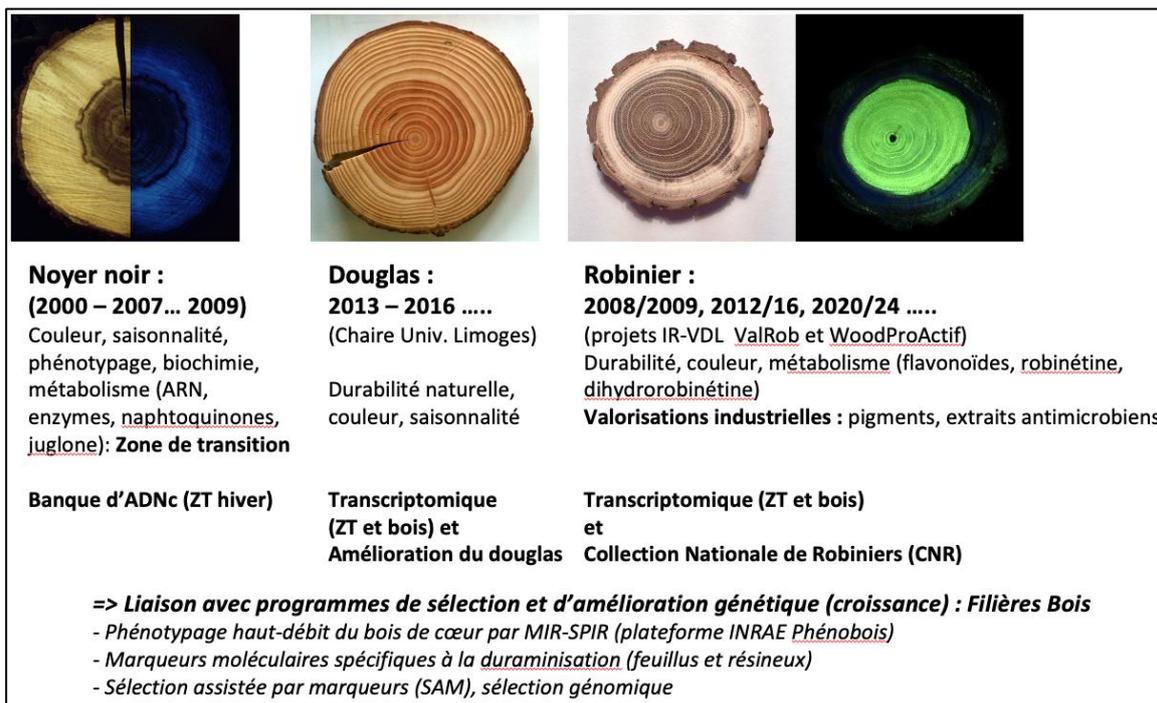


Fig. 1 : Récapitulatif des recherches engagées sur les processus de duraminisation ayant lieu chez trois espèces modèles (2000-présent) : Jusqu'à présent, l'essentiel des travaux de physiologie moléculaire (saisonnalité de l'expansion du bois de cœur, biochimie des extractibles, biologie moléculaire et clonage d'ADNc, transcriptomique) ont été abordé sur de faibles nombres d'individu de noyer noir, douglas et robinier. Ils ont notamment permis de définir la zone de transition aubier-bois de cœur (ZT) à partir de laquelle le clonage ou le séquençage des gènes exprimés au cours des saisons lors de la formation du bois de cœur ont pu être caractérisés. L'utilisation des nouvelles techniques de phénotypage (SPIR-MIR) et de génotypage (NGS, SNPs) haut-débit dans le cadre des programmes d'amélioration en cours chez le douglas et le robinier (sélectionnés jusqu'à présent principalement selon des critères de croissance et de forme) devrait permettre maintenant d'y ajouter des composantes « qualité du bois ».

Remerciements

C.B. tient ici à remercier les membres de la plateforme Phénobois d'Orléans (Nathalie Boizot, Nassim Belmokhtar, Kévin Ader, Orlane Touzet), Guy Costa (Université de Limoges), Philippe Bernier (UEFP, Inrae Pierroton) et Dominique Merzeau (CNPFP) pour leur implication et soutien indéfectible ; la Région Centre Val de Loire pour le financement des projets IR ValRob (2012-2016, convention 00073766) et WoodProActif (2020-2024, convention 00138879) ; les pôles de compétitivité Cosmetic Valley et Végépolys Valley pour leur soutien.

Références

Durand S., Plazanet I., Boizot N., Breton C., Costa G. (BMC, sous presse) Transcriptomic monitoring of Douglas-fir heartwood formation.

Bostyn S., Destandau E., Charpentier J.-P., Serrano V., Seigneuret J.-M., Breton C. (2018) Optimization and kinetic modelling of robinetin and dihydrorobinetin extraction from *Robinia pseudoacacia* wood. *Industrial Crops and Products*, 126, 22-30.

Destandau E., Charpentier J.-P., Bostyn S., Zubrzycki S., Serrano V., Seigneuret J.-M., Breton C. (2016) Gram-Scale Purification of Dihydrorobinetin from *Robinia pseudoacacia* L. *Wood by Centrifugal Partition Chromatography*. *Separations*, 3 (3), 12 p.

Plazanet I., Zerrouki R., Lhernould S., Breton C., Costa G. (2015) Direct Immunological Detection of Wood Cell Wall Polysaccharides after Microwave- Assisted Ionic Liquid Disruption. *Journal of Glycobiology* 4 (1), 4 p.

Beritognolo I., Magel E., A. Abdel-latif, Charpentier J.P., Jay-Allemand C. and Breton C. (2002) Expression of genes encoding chalcone synthase, flavanone 3-hydroxylase, and dihydroflavonol 4-reductase correlates with flavanol accumulation during heartwood formation in *Juglans nigra* L. *Tree Physiol.* 22: 291-300.



Session 2 – La durabilité Conférée du bois (Mercredi 22/11 14h)

La durabilité conférée au bois par une approche physico-chimique fait référence à l'amélioration de la résistance du bois face aux agents biologiques tels que les champignons, les insectes et les microorganismes responsables de la décomposition. Cette approche vise à prolonger la durée de vie du bois en le rendant moins sensible à la dégradation. Il existe différentes méthodes physico-chimiques utilisées pour renforcer la durabilité du bois. Voici quelques-unes des approches couramment utilisées :

- **Traitement sous pression** : Cette méthode implique l'injection d'un produit chimique protecteur dans le bois sous pression. Les produits chimiques couramment utilisés incluent des sels minéraux et des composés organiques. Ces produits chimiques pénètrent dans les cellules du bois et agissent en tant qu'inhibiteurs de croissance pour les organismes nuisibles.
- **Modification chimique** : Cette approche implique la modification de la structure chimique du bois pour améliorer sa durabilité. Par exemple, le bois peut être traité avec des réactifs chimiques pour former des composés résistants à la décomposition biologique.
- **Modification thermique** : Cette méthode consiste à exposer le bois à des températures élevées dans un environnement contrôlé, généralement dans une atmosphère sans oxygène. Cela provoque des changements chimiques et physiques dans le bois, augmentant sa résistance à la dégradation.
- **Utilisation de produits naturels** : Certains extraits de plantes ou d'arbres peuvent être utilisés pour améliorer la durabilité du bois. Par exemple, l'utilisation d'huiles essentielles de plantes répulsives peut aider à prévenir l'infestation d'insectes.

Ces méthodes physico-chimiques peuvent être utilisées individuellement ou combinées pour obtenir des niveaux accrus de durabilité du bois. Il est important de noter que chaque méthode a ses avantages et ses limites, et le choix de l'approche dépendra de divers facteurs tels que l'application prévue, le coût, l'impact environnemental et les réglementations en vigueur.



Joris VAN ACKER (Professor, Université de Gent, BE)

Joris VAN ACKER started his career with a PhD grant in 1984 and then moved on to work as production manager in a plywood mill. He returned to UGent first as private project leader in 1988 and later as research assistant and senior researcher at UGent-Woodlab. Since 2005 Joris Van Acker is professor at UGent and head of the research group UGent-Woodlab, which is also part of the UGent Centre for X-ray Tomography (UGCT). He is Past President of InnovaWood (European federation of wood research institutes) and of the International Research Group on Wood Protection (IRG-WP). He was up to recently president of the ProPopulus organization and is still leading the Working Party on Production Systems for the Bioeconomy of the International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment (IPC) of FAO. He is (co-)author of over 170 publications in refereed journals and he is member of the Wallenberg Prize selection committee.



Sandrine BOUQUILLON (Professeur, Université de Reims)

Sandrine Bouquillon obtient son diplôme d'ingénieur chimiste en 1989 à Strasbourg, puis soutient une thèse de doctorat en 1993 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse dont la thématique est la préparation de complexes organométalliques pour l'imagerie médicale. Après 18 mois de post doc au Max Planck Institut für Kohlenforschung à Mülheim/Ruhr en Allemagne en catalyse, elle exerce ensuite les fonctions d'ATER à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Nommée en 1996 maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, elle travaille sur la synthèse de complexes métalliques (Pd, Pt) chiraux pour la catalyse homogène et la médecine et amorce ses travaux sur la valorisation d'agro-ressources. Après avoir soutenu son HDR en décembre 2002, elle est nommée professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne et exerce ses activités de recherche à l'Institut de Chimie Moléculaire de Reims (UMR CNRS 7312) sur la préparation et l'utilisation de composés issus de la valorisation de la biomasse (dendrimères, liquides ioniques et tensioactifs). Son travail est valorisé notamment par 90 publications et 4 brevets.

Enhancing resistance against decay and improve fire safety of engineered wood products

VAN ACKER Joris

Ghent University, Laboratory of Wood Technology (UGent-Woodlab), Department of Environment, Faculty of Bioscience Engineering, Coupure links 653, 9000 Ghent, Belgium
Joris.VanAcker@UGent.be

Keywords: Cross Laminated Timber, Service life, Treatments, Decay resistance, Fire safety

Abstract

Bio-based building products are considered key in our future socio-economic environment, since they are a very relevant nature-based solution (NbS) to climate change. The statement of President von der Leyen (European commission) to turn the construction sector into a carbon sink is critical in this respect: bio-based materials should be used on a larger and more targeted scale in the future. The long-term use of materials is therefore very important since we need to improve the lifespan of renewable materials to increase its carbon sink potential.

Hence wood is increasingly considered as a main building material. Service life aspects are critical in relation to the EU Construction Products Regulation (CPR). Traditional treatments to protect against fungal decay and the impact of fire are not always performing adequately and often environmental impact has been an important consideration. The option to enhance wood properties using innovative technologies can be combined with better definition of the expectations and requirements. Besides focusing on combined innovative treatments of the wood matrix, also envelope treatments similar to the use of coatings can be envisaged. This all should lead to an increased use of timber and engineered wood products for green building. This paper mainly focusses on the increased use and high potential of CLT (Cross Laminated Timber) and options to use hardwoods and modified wood (like TMT) in relation to moisture dynamics to come to fit-for-purpose material properties even under more hazardous circumstances.

CLT has become a commodity construction product for green building and hence options are explored to cover alongside standard product use also enhanced performance based on material properties and a range of technology tools. Enhanced performance is often related to fire safety and extending service life under conditions with more risk of longer time of wetness, use classes 2 and even 3 according to EN 335. Modern decision support systems can be based on a range of parameters and specific for the functionalities fire safety and service life several technology pathways are feasible leading in future to multi criteria decision making (MCDM) tools for CLT applications. A first one is based on built in or add on component that lead to enhanced performance like the use of plasterboard to increase fire safety. A second technology tool is protection by design that related to service life mainly focusses on avoiding higher moisture content by including barriers to prevent rain impact during construction and leakage and condensation issues during use. When moving towards use class 3, exterior applications, it becomes more relevant to increase the inherent or natural durability against decaying organisms by adding specific treatments in the range of wood preservation and wood modification. Nevertheless, also impacting on the moisture dynamics can be part of the solution, e.g. by means of coatings. Finally, there is the option to combine both fire and decay resistance with often the critical parameter of fixation of active ingredients. This clearly is a technology tool

still to be explored beyond current state of the art, but could bring an extra boost to the use of CLT.

Synthèse de liquides ioniques biosourcés pour la dissolution de polymères issus de bois et l'extraction de composés bioactifs

BOUQUILLON Sandrine

Institut de Chimie Moléculaire de Reims (ICMR - UMR 7312 CNRS)

sandrine.bouquillon@univ-reims.fr

Mots clefs : liquides ioniques, biomasse, lignine, dissolution, extraction

Résumé de la communication

Dans le contexte actuel lié aux questions sur le développement durable, à la disponibilité des matières premières d'origine pétrochimique et à la naturalité souhaitée par les consommateurs, le terme « biosourcé » apparaît de plus en plus. Nous avons développé des liquides ioniques biosourcés qui sont, tout d'abord, préparés selon plusieurs principes de chimie verte, à partir d'agro-ressources qui constituent une alternative innovante et intéressante en matière de sourcing. Ces solvants présentent de faibles toxicités (éco- & cyto-toxicité) et peuvent être utilisés dans la dissolution de biopolymères (cellulose ou lignine Kraft) en vue de les transformer. Ces solvants peuvent également être utilisés pour l'extraction de composés bioactifs, à partir de sourcing végétal.

Remerciements

Nous remercions l'URCA et le FEDER (Cadre d'Excellence Amisolver) pour les bourses post-doctorales (Dalila Saaoui & Jean-Pierre Mbakidi) et le soutien financier ainsi que la SATT Nord pour le soutien financier d'un poste d'ingénieur (Jean-Pierre Mbakidi).

Références

Mbakidi J.-P., Bouquillon S. (2020) PCT/EP2020/070365.

Mbakidi J.-P., Barjhoux I., Aguib K., Geffard G., Rioult D., Palos Ladeiro M., Bouquillon S. (2021) Synthesis of New Betaine-Based Ionic Liquids by Using a "One-Pot" Amidation Process and Evaluation of Their Ecotoxicity through a New Method Involving a Hemocyte-Based Bioassay. ACS Sustainable Chem. Eng. 2021, 9, 15427.

Mbakidi J.-P., Kerkache A., F. Lazar F., Bouquillon S. (2022) Dissolution of Cellulose and Lignin with Biobased Ionic Liquids. J. Solution Chem. 2022, 51(3): 1.

Feuzing F., Mbakidi J.-P., Lazar L., Marchal L., Leroy E., Bouquillon S. (2023) Biobased ionic liquids as solvents of paramylon. J. Mol. Liquids 2023, 370, 120983.



Session 3 – La Résilience Temporelle (Jeudi 23/11 9h)

La durabilité du bois archéologique dépend de nombreux facteurs, notamment de l'essence de bois, de son environnement de conservation et des traitements qui lui ont été appliqués. Dans les conditions normales, le bois archéologique est sujet à la décomposition biologique, à la pourriture, à l'attaque d'insectes et à d'autres formes de dégradation. Cependant, dans certains cas, le bois peut être préservé pendant de longues périodes en raison de conditions environnementales particulières. Par exemple, le bois immergé dans des environnements anaérobies (sans oxygène) comme les marais, les tourbières ou les fonds marins peut être préservé pendant des siècles voire des millénaires. Lorsque le bois archéologique est récupéré, il est généralement très dégradé et fragile. Pour le préserver, différentes techniques peuvent être utilisées :

- Consolidation : Des agents de consolidation tels que des résines ou des polymères peuvent être utilisés pour renforcer la structure du bois et éviter qu'il ne se désagrège davantage.
- Désalinisation : Si le bois a été exposé à des milieux salins, il est important de le désaliniser pour éviter les dommages supplémentaires causés par les sels.
- Stabilisation chimique : Certains traitements chimiques peuvent être appliqués pour arrêter les processus de décomposition et protéger le bois contre les attaques d'insectes et de champignons.
- Contrôle de l'environnement : Les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité et la lumière, doivent être soigneusement contrôlées dans les espaces de conservation pour préserver le bois archéologique. Des mesures telles que la stabilisation de l'humidité relative et la protection contre les rayons UV peuvent être mises en place.

Il est important de noter que la durabilité du bois archéologique peut varier considérablement en fonction de son état initial, de sa composition chimique et des méthodes de conservation utilisées. La recherche continue dans le domaine de la conservation permet de développer de nouvelles techniques pour préserver le bois archéologique de manière durable.



François BLONDEL (Post-Doctorant, Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève)

Docteur en archéologie et dendrochronologue, François s'intéresse à la caractérisation des modes d'exploitation et d'approvisionnement des ressources ligneuses de la protohistoire à l'Antiquité tardive. Ces recherches portent à la compréhension des modes de transformation, de diffusion et d'utilisation du bois à partir des collections archéologiques, afin de renseigner la place du bois et son système économique dans les sociétés et de caractériser l'impact de l'homme et des événements climatiques sur les espaces forestiers. Post-doctorant à l'Institut des Sciences de l'Environnement (ISE) de l'Université de Genève, François est impliqué dans le projet SNF : « The Roman Egypt Laboratory » où il travaille sur la constitution de référentiels de bois importés en Egypte à partir de collections archéologiques afin de percevoir l'impact du climat de cette province de l'Empire romain.



Christophe CORONA (Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire d'Ecologie Alpine, UMR UGA-USMB-CNRS 5553, Genève)

Directeur de Recherche CNRS au laboratoire d'écologie Alpine (Université Grenoble Alpes), ma recherche est basée sur l'utilisation des cernes de croissance des arbres comme bioindicateurs et intégrateurs des fluctuations environnementales. Mes travaux visent notamment à utiliser les cernes de croissance pour reconstruire les variations du climat au cours de l'Holocène et mieux comprendre le rôle des forçages naturels (éruptions volcaniques, insolation, variabilité interne) et anthropique sur les fluctuations reconstruites.

Le bois archéologique face au réchauffement climatique : une durabilité mise à l'épreuve

BLONDEL François

C-CIA - Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève
Chrono-environnement UMR 6249, Besançon
francois.blondel@unige.ch

Mots clefs : Bois gorgé d'eau, matériau périssable, archéologie des zones humides

Résumé de la communication

Les bois archéologiques, et principalement ceux gorgés d'eau, sont fragiles en raison des conditions spécifiques et particulières à leur conservation. Face au réchauffement climatique, quels risques encourent ces vestiges ? Ne sont-ils pas voués à se dégrader et à disparaître au fur et à mesure que le niveau des nappes phréatiques, des cours d'eau, des zones humides se trouve directement impacté par la hausse des températures et la succession des stress hydriques saison après saison.

La durabilité des matériaux ligneux en contexte archéologique n'a jamais été autant d'actualité qu'aujourd'hui. Depuis la découverte des sites palafittiques, comme le site de La Tène par exemple, les archéologues, les spécialistes des bois, les restaurateurs n'ont eu de cesse de développer de nouvelles techniques pour étendre les analyses, riches d'informations, et pour améliorer la conservation de ce matériau archéologique périssable. Qu'en est-il aujourd'hui ? À partir d'exemples de découvertes de bois, cette présentation exposera l'impact des risques et des conséquences du réchauffement climatique sur les bois gorgés d'eau, notamment à partir de l'exemple des puits (Fig. 1), qui constituent l'une des structures les plus sensibles face à ces bouleversements.



Fig. 1 : Cuvelage en chêne d'un puits découvert sur le site du Champ du Four à Saint-Marcel (Saône-et-Loire) (d'après Blondel et Collet 2023).

Remerciements

Je remercie tous les responsables d'opération sur lesquelles j'ai pu intervenir et qui m'ont aimablement autorisé à exploiter les données de leur site.

Références

Blondel F., Collet A., Exploitations, transformations et utilisations du chêne à feuillage caduc sur le site du Champ du Four à Saint-Marcel (Saône-et-Loire) à partir de trois puits cuvelés datés du Second âge du Fer. Valdès L., Cicolani V., Hiriart E. (éd), *Matières premières en Europe au 1^{er} Millénaire av. n. è.* Actes du 45^e colloque international de l'AFEAF (Gijon, 13-15 mai 2021). Paris, AFEAF, 2023, 71-181.

Les bois archéologiques : des archives climatiques à haute résolution spatio-temporelle, insuffisamment exploitées

CORONA Christophe

LECA Grenoble

Christophe.corona@unige.ch

Mots clefs : dendrométrie, hydroclimat, bois archéologiques

Résumé de la communication

Les cernes de croissance des arbres constituent l'ossature de la majorité des reconstructions climatiques à haute résolution développées en Europe. Des reconstructions plurimillénaires de température existent ainsi dans le nord de la Scandinavie, ainsi que dans l'arc alpin, dans les Pyrénées ou les Tatras. Les chronologies composites scandinaves se basent sur des conifères vivants, ayant poussé au cours des derniers siècles, et utilisent des bois morts et subfossiles pour des périodes plus anciennes. Les reconstructions alpines reposent principalement sur des conifères vivants à haute altitude ou piégés dans les glaces.

Alors que ces quelques chronologies composites suffisent pour saisir la variabilité spatiale des températures en Europe, de multiples enregistrements sont nécessaires pour mettre en évidence la variabilité hydroclimatique du continent. Pourtant, jusqu'à présent, seules quelques reconstructions plurimillénaires ont été publiées en Finlande, au sud de l'Angleterre et en Europe centrale.

Les centaines de milliers d'échantillons analysés et datés dans le cadre d'études de bâti ou découverts lors de fouilles sédimentaires ou subaquatiques à travers l'Europe ont le potentiel de pallier cette lacune. Cependant, ce potentiel reste largement sous-exploité en raison de plusieurs contraintes inhérentes à l'utilisation des bois archéologiques en dendroclimatologie. En prenant pour point de départ les bois de construction échantillonnés dans le cadre du programme PCR « du bois pour Limoges », cette présentation exposera les spécificités à prendre en compte et les obstacles à surmonter pour affiner la reconstruction de la variabilité hydroclimatique en Europe à partir des bois archéologiques.



Session 4 – Durabilité Structurale (Vendredi 24/11 8h30)

La durabilité du bois est un sujet important dans le domaine du génie civil. Le bois est un matériau de construction largement utilisé en raison de sa disponibilité, de sa facilité de transformation et de ses caractéristiques esthétiques. Cependant, pour garantir la durabilité du bois dans les applications de génie civil, certaines précautions doivent être prises.

- **Traitement préservatif du bois** : Le bois utilisé dans les structures de génie civil est généralement traité avec des produits chimiques préservatifs pour protéger contre les insectes, les champignons et la pourriture. Ce traitement permet de prolonger la durée de vie du bois en le rendant plus résistant aux attaques biologiques.
- **Protection contre l'humidité** : Le bois est sensible à l'humidité, ce qui peut entraîner une dégradation accélérée. Il est donc important de mettre en place des mesures pour protéger le bois de l'humidité excessive, comme l'utilisation de membranes imperméables, de systèmes de drainage appropriés et de revêtements de protection.
- **Conception adéquate** : Une conception appropriée est essentielle pour assurer la durabilité du bois dans les structures de génie civil. Cela implique de prendre en compte les charges, les contraintes et les conditions environnementales auxquelles le bois sera exposé. Une conception adéquate permettra de minimiser les déformations excessives, les contraintes critiques et les risques de dégradation prématurée.
- **Entretien régulier** : Un entretien régulier est nécessaire pour préserver la durabilité du bois. Cela peut inclure des inspections périodiques pour détecter les signes de détérioration, la réparation des dommages mineurs, le remplacement des éléments dégradés et l'application de revêtements protecteurs supplémentaires si nécessaire.
- **Utilisation de bois durable** : Le choix du type de bois utilisé est également important pour assurer la durabilité. Opter pour des essences de bois durables et provenant de sources responsables contribue à réduire l'impact environnemental et à promouvoir la durabilité à long terme.

En résumé, la durabilité du bois dans le génie civil dépend de plusieurs facteurs, notamment du traitement préservatif, de la protection contre l'humidité, de la conception adéquate, de l'entretien régulier et du choix de bois durable. En suivant ces principes, il est possible de maximiser la durée de vie du bois dans les applications de génie civil.



Romain RÉMOND (LERMab Epinal, Maître de Conférences Université de Lorraine, HDR)

Enseignant à l'ENSTIB et chercheur au LERMab sur les thèmes de la Physique du Bois et des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux lignocellulosiques avec des applications au séchage du bois et à la thermique du bâtiment.



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 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 thermochimique (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.

Gestion de l'humidité dans les bâtiments intégrant des matériaux biosourcés dans leur enveloppe

RÉMOND Romain

Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F-54000 NANCY, France

romain.remond@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Transferts masse-chaleur, construction bois, matériaux lignocellulosiques, caractérisation, modélisation.

Résumé de la communication

L'enveloppe d'un bâtiment doit faire face aux charges d'humidité extérieures et intérieures qui agissent sur les constructions. On observe depuis une vingtaine d'années que la diminution constante de la consommation énergétique des habitations, en améliorant la performance de l'enveloppe et en contrôlant le renouvellement de l'air intérieur, s'est accompagnée d'une augmentation des dégâts liés à l'humidité. Ces problèmes pathologiques ont différentes origines, changements dans le fonctionnement du bâtiment, erreurs de conception, erreurs de pose, erreurs dans le choix des matériaux, etc. Ces problèmes d'humidité peuvent être étudiés et éventuellement évités grâce à l'analyse hygrothermique dynamique qui permet d'explorer le comportement à long terme de l'enveloppe (Künzel 1995, Pacte 2021). Mais des écarts demeurent entre les prédictions de la simulation numérique et les mesures lorsque l'enveloppe utilise des matériaux fortement hygroscopiques comme les isolants de fibres de bois (Hygrobat 2010).

Ces résultats ont amené les scientifiques à s'interroger sur la fiabilité des méthodes de caractérisation des propriétés de transferts d'humidité, et sur un raffinement nécessaire des phénomènes physiques à prendre en compte dans la modélisation des transferts masse-chaleur (Duforestel 2015, Rémond et al. 2018, Challansonnex 2019, Perré et al. 2022, Assaad et al. 2023). Le besoin de mieux comprendre le comportement hygrothermique des matériaux biosourcés s'est renforcé ces dernières années car leur utilisation est croissante dans les différentes couches de l'enveloppe du bâtiment. En outre, ils apportent de nombreuses questions qui dépassent désormais les questions du risque de condensation dans la masse et de pérennité : impacts de l'hygroscopicité des matériaux sur le confort des occupants, sur la facture énergétique, sur les conditions climatiques intérieures pour la conservation des objets et bâti du patrimoine, etc. Cette présentation abordera l'évolution des outils de gestion de l'humidité dans les enveloppes et les nouvelles questions qui se posent dans ce domaine, en regardant le comportement hygrothermique particulier des matériaux de construction biosourcés comme le bois.

Références

Assaad, M. El , Colinart, T., Lecompte, T. (2023) Thermal conductivity assessment of moist building insulation material using a Heat Flow Meter apparatus, *Build. Environ.* 234 110184.

Challansonnex, A. (2019) Transferts couplés chaleur/masse dans les matériaux de constructions biosourcés : Investigation expérimentale et théorique du non-équilibre local. Thèse, Université Paris-Saclay

Duforestel, T. (2015) Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments, mémoire d'HDR, l'Université Claude Bernard Lyon 1.

Hygrobat. (2010) Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants. Programme ANR Habisol-Ref. ANR-10-HABI-0005.

Künzel, H. M. (1995) Simultaneous heat and moisture transport in building components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters ». PhD, University of Stuttgart.

Pacte, Programme. (2021) Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température/humidité dans les parois de bâtiment. <https://www.programmepacte.fr/doc/determination-des-hypotheses-pour-les-simulations-de-transferts-couples-temperature-humidite>.

Perré, P., Rémond, R., Almeida, G. (2022) Multiscale analysis of water vapor diffusion in low density fiberboard : Implications as a building material. *Construction and Building Materials*, 329, 127047.

Rémond, R., Almeida, G., Perré, P. (2018) The gripped-box model : A simple and robust formulation of sorption hysteresis for lignocellulosic materials. *Construction and Building Materials*, 170, 716-724.

Les interactions bois-champignons : durabilité et soutenabilité des matériaux bois

BESSERER Arnaud

Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F-54000 NANCY, France

arnaud.besserer@univ-lorraine.fr

Mots clefs : bois, dégradation, recyclage

Résumé de la communication

Le bois est un matériau issu du vivant et naturellement biodégradable. Le bois est un des seuls matériaux permettant de remplacer le béton en usage structurel. De plus, de nombreux développements ont été réalisés ou sont en cours pour valoriser les co-produits de la filière forêt-bois en matériaux. Le défi de la décarbonation du secteur du bâtiment en lien avec l'urgence climatique passe ainsi plus que jamais par le défi de la construction durable et soutenable utilisant le bois et les matériaux dérivés. La durabilité en service est étroitement liée aux conditions de mise en œuvre du matériau. Les différents agents biologiques et particulièrement les champignons causant une altération esthétique ou biologique au matériau seront présentés ainsi que leurs conditions de développement et les solutions de prévention communément mise en œuvre. La tendance actuelle est de réduire au maximum l'utilisation de substances toxiques dans la mise en œuvre des matériaux bois. Parallèlement le recyclage et réemploi du bois ainsi que l'optimisation de matière visent à maximiser la durée de fixation du CO₂ dans le bois afin de rendre le plus durable, au sens écologique, l'utilisation de la ressource bois. Dans un contexte de tension sur la matière première, le recyclage et la valorisation cascade des co-produits et des bois en fin de vie par des procédés verts sont à combiner avec une optimisation de la ressource en bois d'œuvre. Le recyclage du bois sera illustré par des exemples de projets de recherche menés au laboratoire et mis en perspective de projets européens.

Remerciements

Nous remercions l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE) ainsi que pour le financement du projet woodwaste (ANR-18-CE04-0012). Nous remercions également la plateforme SILVATECH (Doi : 10.15454/1.5572400113627854E12) du centre de recherche INRAE Grand-Est Nancy pour le support aux observations microscopiques. Nous remercions les partenaires industriels CF2P et Ecomaison ainsi que l'ADEME pour les financements des thèses de Sarah Troilo et Kyle Aguilar.

Références

- Toussaint, M., Bontemps, C., Besserer, A., Hotel, L., Gérardin, P., Leblond, P., 2016. Whole-cell biosensor of cellobiose and application to wood decay detection. *Journal of Biotechnology* 239, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.10.003>
- Kleindienst, Q., Besserer, A., Antoine, M.-L., Perrin, C., Bocquet, J.-F., Bléron, L., 2017. Predicting the beech wood decay and strength loss in-ground. *International Biodeterioration & Biodegradation* 123, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.06.006>
- Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., Brosse, N., 2021. Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. *Polymers* 13, 1752. <https://doi.org/10.3390/polym13111752>

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. <https://doi.org/10.3390/jof8070706>

Troilo, S., Besserer, A., Rose, C., Saker, S., Soufflet, L., Brosse, N., 2023. Urea-Formaldehyde Resin Removal in Medium-Density Fiberboards by Steam Explosion: Developing Nondestructive Analytical Tools. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 11, 3603–3610. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05686>

Posters et présentations flashes

| SESSION A | | Mercredi 22/11/2023 - 10h | |
|-----------|--|---|--|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| A01 | Relationships between chemical composition and decay durability of <i>Coula edulis</i> baill as an alternative wood species in Gabon | BOPENGA BOPENGA Christ Stone Arnaud, DUMARÇAY Stéphane, GÉRARDIN Philippe, <u>EKOMY ANGO Serge</u> | LaReVaBois (GA), IRT (GA), Lermab |
| A02 | Estimation des transferts hygrothermiques dans une cellule-test en rondins | MEDJELEKH Dalel, ULMET Laurent, <u>DUBOIS Frédéric</u> | GC2D |
| A03 | Évaluation de la capabilité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois | NASRI Linda, CURTI Rémi, EYMA Florent | ICA |
| A04 | Assessment of Fungus and Termite Resistance in Four Eucalyptus species Cultivated in Tunisia | ELAIEB Mohamed, BEN AYED Sarra, Kachouri Hbib, KHOUJA Mariem, DUMARÇAY Stéphane, DE FREITAS HOMEN DE FARIA Bruno, THEVENON Marie-France, GERARDIN Philippe, CANDELIER Kévin | LEF (TN), Lermab, FUV (BR), BioWooEB |
| A05 | Analyse de la complaisance du bois dans des essais de fluage multipaliers | BONTEMPS Arthur, GODI Gaël, MOUTOU PITTI Rostand, FOURNELY Eric, GRIL Joseph | I. Pascal, Labecam |
| A06 | Approche multi-échelles d'un procédé de recyclage du MDF par voie biologique | TROILO Sarah, BESSERER Arnaud, SOUFFLET Lucas, SAKER Safwan, BROSE Nicolas | Lermab, CF2P, Critt Bois |
| A07 | Mise au point d'un procédé d'impression 3D pour le recyclage des sciures de MDF | RAMAUX Johan, NOUVEL Cécile, ZIEGLER-DEVIN Isabelle, BESSERER Arnaud, NOYEL Mélanie | Acta Mobilier, LRGP, Lermab |
| A08 | Contribution à la caractérisation de bois locaux du Cameroun pour la conception de turbines pour pico-centrales hydroélectriques | FOUEDJOU NJOYA Blaise, KENFACK Joseph, ROSENKRANTZ Eric, AUGEREAU Franck, LAUX Didier, LANGBOUR Patrick, GERARD Jean, ARNOULD Olivier, VOUFU Joseph | Enspy (CM), IES, BioWooEB, LMGC |
| A09 | Etude de la performance au collage du <i>Pinus patula</i> dans la fabrication de panneaux lamellés collés | <u>TRIANOSKI Rosilani, MICHAUD Franck</u> , MATOS, Jorge, IRLE Mark, MOREAU Jérôme, SIMON Flore, DUARTE Luigiano | U.Paraña (BR), ESB |
| A10 | Présentation pratique de la méthode de calcul du PSF à partir de la variation de surface du plan radial-tangentiel | GUIBAL Daniel, GUYOT Alban | BioWooEB |
| A11 | Caractérisation mécanique de panneaux CLT par méthode non destructive | BRANCHERIAU Loïc, FAIRCLOTH Adam, KARAMPOUR Hassan, KUMAR Chandan | BioWooEB, QLD gov (AU), U.Griffith (AU), U.South Queensland (AU) |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

| SESSION A | | Mercredi 22/11/2023 - 10h | |
|------------------|--|---|--|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| A12 | Utilisation de la Spectroscopie Proche-Infrarouge Portable sur Terrain pour l'Identification des Bois Précieux de Madagascar et de ses potentiels bois de substitution en vue de leurs gestions durables | RANDRIAMBININTSOA Tiavina, RASOAMANANA Lalaina Patricia, CHAIX Gilles, RAMANANANTOANDRO Tahiana | Agap, U.Antananarivo (MG) |
| A13 | Regenerative quality of wood cladding | BRUN Géraldine, ALMEVIK Gunnar, BJÖRLING Nils, JOHANSSON Karin | U.Göteborg (SE), Chalmers U.Tech. (SE) |
| A14 | Evaluation du taux de restitution d'énergie en mode I d'un LVL de peuplier | PEIGNON Axel, SERRA Joël, GELARD Léo, CANTAREL Arthur, EYMA Florent, CASTANIE Bruno | ICA, Insa Toulouse |
| A15 | Projet COPEAU BOIS : modification de bois massif pour une utilisation en lunetterie | LAGARDE Hélène, ROY Philippe, BELLONCLE Christophe, BLANCHARD Philippe | ESB, MB Production |
| A16 | Etude comparative du vieillissement du bois lamellé collé sous cycles accélérés et en conditions naturelles | GREFFIER Guilhem, ESPINOSA Luis, EYMA Florent, PERRIN Marianne | ICA |
| A17 | Modélisation de l'hétérogénéité des contraintes dans les lamelles aboutées panneautées de chêne | SOH MBOU Delin, BESSEAU Benoît, POT Guillaume, VIGUIER Joffrey, ROLLE Jecolia, MILHE Louis | Labomap, Durcef |
| A18 | Sur le comportement au choc du bois | MAIGRE Hubert, CREIGHTON Cian, GRUAZ Luce, LABOUYRIE DUARTE Amaya | Lamcos, GM Insa Lyon |
| A19 | Types, quantities and heavy metal content of the finishes on fibreboard waste | LEBRETON Flore, LAGARDE Hélène, IRLE Mark1, KUTTER Marie, BELLONCLE Christophe, Julia BUCHNER | ESB, LMU Munich (DE) |
| A20 | Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques de placages d'hêtre | DEMOULIN Leyne, POT Guillaume, DENAUD Louis, GIRARDON Stéphane, MARCON Bertrand | Labomap |
| A21 | Automatisation de la détection des fissures de déroulage par apprentissage profond | MARC Caroline, MARCON Bertrand, DENAUD Louis, GIRARDON Stéphane, BUTAUD Jean-Claude | Labomap |
| A22 | Combined simulation and machine learning for process optimization in wood industry | BOLES George, POMMIER Régis, TRAORE Mamadou | I2M |
| A23 | Non-destructive measurement of orthotropic elastic properties of wood samples by their modal impulse response | Al FAY Alaa, JULLIEN Delphine, CORN Stéphane, ARNOULD Olivier, LANGBOUR Patrick | LMGC, Mines Alès, BioWooEB |
| A24 | Valorisation d'essences de feuillu | CURIAL Hugo, DENAUD Louis, Marcon Bertrand, VIGUIER Joffrey | Labomap |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

| SESSION B | | Mercredi 22/11/2023 - 15h | |
|------------------|---|---|--------------------------------------|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| B25 | Bienvenue à SACHA, une base de données interactive de CHARbons d'Afrique du Sud : un outil pour l'anthracologie | PUECH Elysandre, THERY-PARISOT Isabelle | Cepam |
| B26 | Mechanical Properties of Epoxidized Oil Heat Treated Eucalyptus Wood | HEJAZI Seyed Javad, <u>ABEDINI Raoufeh</u> , GHORBANI Maryam, DASTOORIAN Foroogh | U. Sari (IR) |
| B27 | Etude du vieillissement de contreplaqués collés par résines thermoplastiques et renforcés par fibres naturelles | PRUNIER Clément, ROUSSEAU Jérôme, BUTAUD Pauline, JEANNIN Thomas, PLACET Vincent | Drive, Femto-ST |
| B28 | Modélisation de l'effet trachéide | BOIVIN Juliette, FROEHLI Luc, GIRARDON Stéphane, TEYSSIEUX Damien, DENAUD Louis | Labomap, Femto-ST |
| B29 | Quantification de la contrainte mécanique exercée par l'écorce sur le cambium en croissance | BOURSAT Thomas, ALMÉRAS Tancrede, BARÉS Jonathan, CLAIR Bruno | LMGC |
| B30 | Comportement hystérétique des assemblages mécaniques de type tige | GOMEZ Dalmer, CUMUNEL Gwendal, BORNERT Michel, PEYRET Nicolas, CATTEROU Thomas | Navier, Quartz, FCBA |
| B31 | La maquette des Halles de Villeréal. Des perspectives d'artisans pour contribuer à l'étude scientifique d'une construction en bois vert | BRIHIEZ Joseph, LEFEVRE Marc, RAMBAUD Paul | MNHN, Assoc. Iron Rabbits |
| B32 | Caractérisation biochimique et phénotypage haut-débit de la collection nationale de robinier par spectrométrie proche infrarouge | BELMOKHTAR Nassim, <u>TOUZET Orlane</u> , BOIZOT Nathalie, BERNIER Frédéric, BRETON Christian | BioForA, Phenobois, UEFP |
| B33 | Approche par calculs fractionnaires du fluage viscoélastique non linéaire du bois d'Entandrophragma cylindricum (Sapelli) | NGUEDJIO Loïc Chrislin, NGAMGA MABEKOU Sandrine, MOUTOU PITTI Rostand, <u>TALLA Pierre Kisito</u> | UR2MSP (CM), I.Pascal, Cenarest (GA) |
| B34 | Utilisation des écomatériaux locaux pour la construction des bâtiments à empreinte carbone neutre en République Démocratique du Congo | LEWO NKONDI Blanca, AZAMA Nicolas, BLAYSAT Benoit, MOUTOU PITTI Rostand | INBTP (CD), I.Pascal, Cenarest (GA) |
| B35 | De la valorisation d'une plante invasive (Baccharis halimifolia) vers l'écoconception d'un panneau bois local | BERTRAND Gaël, LACOSTE Clément, LE MOIGNE Nicolas, HOSTEQUIN Anne-Claire, MAGNIN Arnaud | Mines Alès, MSciBois, Atelier Luma |
| B36 | Etude du comportement mécanique du bois en compression en fonction de la température et l'humidité | DAHER Hussein, CARE Sabine, FORET Gilles, PAYET Loïc | Navier, ENPC |
| B37 | Mise en évidence par haubannage de la réponse thigmomorphogénétique de deux clones d'hévéa | ENGONGA EDZANG Arnould, GRIL Joseph, MOUTOU PITTI Rostand, BADEL Eric | PIAF, I.Pascal, Cenarest (GA) |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

| SESSION B | | Mercredi 22/11/2023 - 15h | |
|------------------|---|--|---|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| B38 | Tropical agro-wastes for environmentally friendly non-load bearing bio-composites and comparative analysis with wood panels | MANSOUR Souha, VIRETTO Amandine, THEVENON Marie-France, BRANCHEREAU Loïc | BioWooEB |
| B39 | Modélisation des déformations de placages et contreplaqués | KACHOUH Cyril, GIRARDON Stéphane, DENAUD Louis, MARCEL-MATHEY Thibaud, VIGUIER Joffrey | Labomap |
| B40 | WoodSun : un projet collaboratif de science ouverte du GDR 3544 Sciences du Bois : La structure du bois agrandie en 3D | BADEL Eric, ARNOULD Olivier, BOZONNET Cyril, CONCHON Pierre, DUHAMEL Yvan, RUELLE Julien, VIGUIER Joffrey | Piaf, LMGC, Pro3D, Silva, Labomap |
| B41 | Caractérisation par tomographie ultrasonore du chêne vert employé dans la charpente de la Cathédrale Notre Dame de Paris | DUBOIS Frédéric, AFOUTOU Jérôme, ZHANG Xi | GC2D |
| B42 | Evaluation de la durabilité de panneaux isolants à base de fibres de bois sous conditions tropicales par techniques de mesure de champs | MAHAMAT SALEH Atteb, DUPRE Jean-Christophe, BOSSU Julie, DOUMALIN Pascal | PPrime, Ecofog (GF) |
| B43 | Reconstruction 3D de l'orientation des fibres autour d'un nœud de Douglas | PENVERN Hélène, POT Guillaume, VIGUIER Joffrey, COLLET Robert, DÉMOULIN Leyne, ROUX Benjamin, OLSSON Anders, HU Min | Labomap, U. Linnaeus (SE) |
| B44 | Élaboration d'une résine époxy biosourcée | SANCHEZ Alexandre, CASTETS Laurent, ROBLES Eduardo | Iprem, Gascogne Bois |
| B45 | Production of mycocomposite from wood industry waste | AGUILAR Kyle, FIGEL Laura, SAKER Safwan, SOUFFLET Lucas, BROSSE Nicolas, BESSERER Arnaud | Lermab, Critt Bois |
| B46 | Méthodologie de couplage des marqueurs chimiques et des marqueurs génétiques dans la traçabilité du bois. Cas du Tali, genre Erythrophleum | ARNAUD Maëlle, NDIADI BOUROUBOU Dyana, BOESCHOTEN Laura, ROCHA VENÂNCIO MEYER-SAN Barbara | Cenarest (GA), MSciBois, U. Wageningen (NL) |
| B47 | Projet OPTIUSE : Optimisation des doses efficaces à appliquer pour garantir les performances des bois autoclavés en fonction des usages et des durées de vie ciblés | RUBIO Bernadette, ANSARD David, FORTERRE Jean-Denis, LORIEAU Christophe, GALLIEN Marlène, EPINAT Eric, LE BAYON Isabelle | FCBA, FNB, PiveteauBois, Rondino |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

| SESSION C | | Jeudi 22/11/2023 - 10h | |
|------------------|--|---|--|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| C48 | Optimisation of alcoholysis treatment in Poplar wood delignification | CHIN Yi Hien, BIWOLE Pascal, GRIL Joseph, VIAL Christophe, MOUTOU PITTI Rostand, OULDBOUKHITINE Salah-Eddine, LABONNE Nicolas, HORIKAWA Yoshiki | I.Pascal, Dagard, Persee, Piaf, Cenarest (GA), TUAT (JP) |
| C49 | Stabilité dimensionnelle et tempéraments écologiques de feuillus tropicaux du Gabon | NKENE MEZUI Estelle, BRANCHEREAU Loic, IKOGOU Samuel, MOUTOU PITTI Rostand | I.Pascal, BioWooEB, LaReVaBois (GA), IRT (GA) |
| C50 | Valorisation de biomasses résiduelles de menuiserie en matériau composite | LE COURBE Arnaud, CARAYON Lionel, CANDELIER Kévin, VIRETTO Amandine | Carayon, MSciBois, BioWooEB |
| C51 | La plateforme SILVATECH, infrastructure scientifique collective | RUELLE Julien, ANGELI Nicolas, ROSE Christophe, GERARD Bastien | Silva |
| C52 | Projet FIXPIN : Mise en place d'un procédé thermique type industriel de contrôle de l'exsudation de la résine de Pin maritime (Pinus pinaster) | MEHATS Jérémy, SANCHEZ Alexandre, CABARET Thomas, CASTETS Laurent, ROBLES Eduardo, CHARRIER Bertrand | Iprem, Protosphère, Gascogne Bois |
| C53 | Dissolution de biopolymères et extraction avec des liquides ioniques biosourcés | MBAKIDI Jean-Pierre, SAAOUIDalila, BACHA Katia, BOUQUILLON Sandrine | ICM Reims |
| C54 | Experimental measure of the memory strain of wood sample during drying | STÉPHAN Antoine, PERRÉ Patrick, L'HOSTIS Clément, RÉMOND Romain | Lermab, LGPM, FCBA |
| C55 | Évaluation des propriétés de transfert d'humidité par analyse inverse de la cinétique de séchage d'une pile de bois dans un séchoir industriel | SIMO-TAGNE Merlin, STÉPHAN Antoine, PERRÉ Patrick, L'HOSTIS Clément, RÉMOND Romain | Lermab, LGPM, FCBA |
| C56 | Etude d'un procédé de protection et stabilisation du hêtre par imprégnation et formation in-situ de polyesters à base d'acide malique | FREDON Emmanuel, CHABERT Adèle, RÉMOND Romain | Lermab |
| C57 | Etude expérimentale des interactions bois-microorganismes : cas spécifique des immeubles de santé | ESSONO MINTSA Morel, PAILHORIES Hélène, AVIAT Florence, LANATA Francesca, MICHAUD Franck, BELLONCLE Christophe | ESB, CHU Angers, Hifih, Your Research |
| C58 | EVIBOIS: Monitoring of the Vibratory Behaviour of Tall Timber Building | JANOT Dorian, VIEUX-CHAMPAGNE Florent, GUEGUEN Philippe, BOUDAUD Clément | 3SR, ISTerre, ESB |
| C59 | Conception et développement de structures écologiques à architecture contrôlée à base de mycélium | FIGEL Laura, AGUILAR Kyle, SAKER Safwan, BESSERER Arnaud, BROSSE Nicolas | Lermab, Critt Bois |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

| SESSION C | | Jeudi 22/11/2023 - 10h | |
|------------------|--|---|---|
| No | Titre | Auteurs* | Labos |
| C60 | Variabilité de la proportion d'aubier et de la nodosité d'épicéa commun, de sapin pectiné et de pin sylvestre | RAVOAJANAHARY Tojo, DAQUITAINE Renaud, URSELLA Enrico, REMOND Romain, LEBAN Jean-Michel | Siat, Microtec, Lermab, BEF |
| C61 | Innovative particleboards made of chemically modified sugarcane bagasse Biological durability evaluation | AHMADI Peyman, EFHAMISISI Davood, <u>THEVENON Marie-France</u> , ZAREA HOSSEINABADI Hamid, OLADI Reza, GERARD Jean | U.Tehran (IR), BioWooEB |
| C62 | Construction bas carbone : identification des éléments fortement carbonés pour faire émerger des principes de conception favorable – Application pratique à un bâtiment de santé | LANATA Francesca, BOUDAUD Clément, BELLONCLE Christophe, MICHAUD Franck | ESB |
| C63 | Application de la méthode des EF pour la modélisation du déroulage du bois vert | YAICH Mariem, VIGUIER Joffrey, DENAUD Louis, HAKIM Said Youssouf, COTTIN Fabrice | Labomap |
| C64 | Étude de l'intégration du procédé de Stratoconception® dans le processus de conception d'architectures non-standards en bois | NEHLAWI Anwar, MEYER Julien, BLÉRON Laurent, FRÉCHARD Victor | MAP CRAI, Lermab |
| C65 | Master Sciences du Bois à l'Université de Montpellier : Bilan après 3 ans de pédagogie active | AUTISSIER Aurélie, BARDET Sandrine, CLAIR Bruno | U. Montpellier, LMGC |
| C66 | Variabilité du $\delta^{13}C$ le long du rayon de bois tropicaux de la région amazonienne brésilienne | SOUZA-SILVA Isabela Maria, ARAÚJO, Maria Gabriella, BATISTA Ana Claudia, MARTINELLI Luiz Antonio | U. São Paulo (BR), SilvaTech |
| C67 | Qualification in-situ de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive | HAFSA Wael, <u>ANGELLIER Nicolas</u> , TAKARLI Mokhfi, POP Ion Octavian | GC2D |
| C68 | Développement de revêtements métalliques et céramiques sur le bois pour sa protection au feu et aux termites | PODGORSKI Laurence, DENOIRJEAN Alain | FCBA, IRCER |
| C69 | Préservation de la biodiversité ligneuse locale : Evaluation des pratiques patrimoniales dans la gestion durable des forêts de Guadeloupe | FREULARD Justine, BEAUCHENE Jacques | Istar, Ecofog (GF) |
| C70 | Vers la mise en place d'abaque d'équilibre hygroscopique des essences des feuillus tropicaux | ASSEKO ELLA Martian, MOUTOU PITTI Rostand, GIACOMO Goli, GRIL Joseph | I.Pascal, Cenarest (GA), Dagri (IT), Piaf |
| C71 | Effets synergiques et historiques des liquides hydroalcooliques sur le gonflement du chêne | DUSSAUT Cédric, COLIN Julien, CASALINHNO Joel, TEISSIER DU CROIS Rémi, LITOUX-DESRUES François, ABADIE Charlotte, PERRE | CentraleSupelec, Chene&Cie, |

* *Présentateur souligné si différent du premier*

Relationships between chemical composition and decay resistance of *Coula edulis* Baill as an alternative wood species in Gabon

BOPENGA BOPENGA Christ Stone Arnaud¹, DUMARÇAY Stéphane²,
GÉRARDIN Philippe², [EKOMY ANGO Serge](mailto:EKOMY_ANGO_Serge@irt.cnrsgabon.org)¹

¹Institut de Recherche Technologique (IRT/Cenarest), Gros Bouquet, BP 9154, LBV, Gabon

²Université de Lorraine, Inra, EA 4370 USC 1445 LERMAB, Faculté des Sciences et Technologie, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

iniestabopenga@gmail.com

Keywords: Durability, Chemical composition, Antifungal, Extractive

Context and objectives

The natural durability of wood is defined as its ability to resist to biological degradation caused by fungus and insects and weathering without any chemical treatment (Rowell et al. 2005). In reality, only the heartwood of some species is durable; sapwood being in general easily degraded. Although several factors like hydrophobicity, density, lignin and extractives contents have been reported to be involved in wood natural durability, most of the authors agree with the import role played by extractives (Antwi-Boasiako and Pitman 2009). Extractives content varies widely in wood (Antwi-Boasiako et al. 2010, Kilic and Niemz 2012). Extractives are low molecular weight substances found in the porous structure of wood. These are generally lipophilic or hydrophilic secondary metabolites that are not essential for tree growth. The content and composition of the extractive substances vary according to the wood samples, the part of the tree, its age, the location and the season of harvesting as well as the period and conditions of storage. Extractive substances are responsible for wood characteristics such as color, odor, natural durability and acoustic properties (Aloui et al. 2004). They protect wood from ultraviolet rays, pathogens and herbivores (Harborne and Williams 2000). They consist of several families of compounds such as waxes, fats, terpenoids, quinones and a large variety of phenolic compounds (simple phenols, flavonoids, lignans, stilbenes, tannins...). Phenolic compounds are the most important class of extractives presenting antifungal, antioxidant and other properties that are potentially valuable (Hillis 1972). In addition, naturally durable wood species contained toxic compounds that are generally polyphenols such as tannins, flavonoids and stilbenes. Some species also have non-phenolic extractives such as quinones and terpenoids. For example, the molecules responsible for the natural durability of *Tectona grandis* consist of toxic quinones, which present strong antitermitic and fungicidal properties. The toxicity of extractive substances correlates with their antioxidant activity (Amusant et al. 2007). The most important agents of wood biodegradation are fungi and termites (Antwi-Boasiako et al. 2010). However, while natural durability of most of temperate wood species has been well documented (Aloui et al. 2004, Guilley et al. 2004), less information is available on the natural durability of many Congo Basin wood species (CIRAD 2008, Bopenga bopenga et al. 2020a,b,c). The Congo Basin hosts an exceptional biodiversity for trees as well as for flora and fauna. Only a few wood species are exploited because of their high market value (AGEOS 2015). The direct consequence of this selective exploitation is the over-utilization of certain wood species. Several lesser-known species are available in Gabon including the Gabonese hazel (*Coula edulis* Baill), whose wood is used by the local populations for its longevity because of its resistance to fungi and insects, including termites. The wood is used in the construction of huts as poles or lintels (Moupela C et al. 2010, 2013). The goal of this study was to better

understand the reasons for the natural durability of this species including: (i) the effect of extractives on decay resistance, (ii) the effect of extractives on the fungal growth inhibition, and (iii) the role of wood chemistry in relation to durability.

Material and method

Material. Heartwood of Gabon hazel (*C. edulis*) was obtained from a 50-cm-diameter log taken from between 1.50 and 2.50 m above the ground. The tree was harvested at the Ayémé primary forest in Gabon located in the Estuary province. Tree age was estimated between 50 and 75 years. 30×10×5 mm³ heartwood blocks were cut in the longitudinal, radial and tangential directions, respectively. The blocks were randomly used for the different tests performed. Sawdust of *C. edulis* Baill was prepared using a ball mill (Retsch SM 100), sieved (Ø=0.160 mm) and stored in glass fasks after drying in an oven at 70 °C to avoid extractives degradation.

Method. For the extraction blocks, blocks of heartwood were extracted to evaluate the effect of extractives on wood decay durability. The blocks were Soxhlet extracted for three weeks using acetone-water (1/1, v/v), the apparatus being refuelled when needed (Fig. 1). A duration of three weeks was chosen to improve extraction, which is known to be more difficult on blocks due to a lower exchange surface compared to sawdust. The blocks were then dried at 103 °C and weighed (m₁). Extraction yield was determined using:

$$\text{Yield of extraction (\%)} = [(m_0 - m_1) / m_0] \times 100 \quad (1)$$

where m₀ was the anhydrous mass of the blocks before extraction dried at 103°C and m₁ the anhydrous mass of the blocks dried at 103°C after extraction.



Fig 1: (a) Sanded specimens 30×10×5 mm³; (b) Extraction of the test pieces using Soxhlet.

For the extraction sawdust, 10 g of finely ground dried heartwood was successively Soxhlet-extracted for 24 hours with solvents of increasing polarity: dichloromethane, acetone, toluene-ethanol (2/1, v/v) and water. each extraction was performed in triplicate. The extracts were concentrated using a rotary evaporator under vacuum, except for water extracts which were lyophilized. The extracts were then dried in a desiccator under vacuum in the presence of P₂O₅ and weighed regularly until constant mass (m_e). The yield of extract is determined using:

$$\text{Yield of extract (\%)} = (m_e / m_s) \times 100 \quad (2)$$

where m_e was the mass of extract and m_s the mass of sawdust used for extraction. The extracts were then recovered and stored in closed bottles in the dark.

Decay resistance tests. The mass loss (ML) caused by fungal attack in Fig. 2 and the moisture content (MC) is determined as follows:

$$\text{ML (\%)} = [(m_0 \text{ or } m_1) - m_3] / (m_0 \text{ or } m_1) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{MC (\%)} = (m_2 - m_3) / m_3 \times 100 \quad (4)$$

where m_0 was the initial anhydrous mass of unextracted blocks, m_1 the anhydrous mass of extracted blocks before fungal exposure, m_2 the mass of wet blocks after fungal exposure and m_3 the dried mass of blocks after fungal exposure.

Corrected mass loss was calculated as follows:

$$ML_{\text{corrected}} (\%) = ML (\%) - ML_{\text{diffusion}} (\%) \quad (5)$$

where $ML_{\text{diffusion}}$ was the mean of mass loss values obtained for diffusion tests. The inhibition of fungal growth by extracts is shown in Fig. 3 and the analysis of extracts in Fig. 4.



Fig. 2: Comparison of wooden test pieces with different fungi.

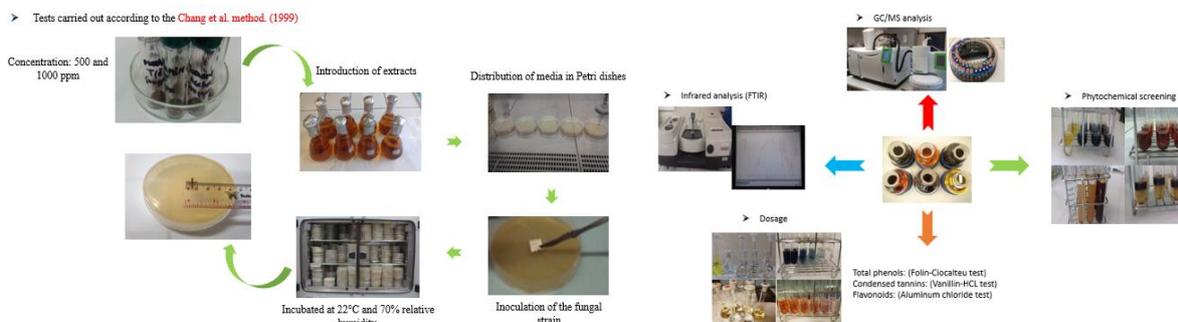


Fig. 3: Inhibition of fungal growth by extracts test

Fig. 4 : Analysis of extracts tests

Results and discussion

Extractive contents. Extractive yield varied with solvent to another (Tab. 1). The yield was lowest with dichloromethane (1.1%), probably due to the limited amounts of non-polar compounds in *C. edulis* heartwood. The highest extract content was obtained with acetone (8.5%). None of the solvents used removed all extractives because of their different solubilities. Previous studies suggest that the non-polar solvents mainly extracted oils, grease or terpenes, while polar solvents removed polyphenols such as lignans, stilbenes, flavonoids, tannins.... The total yield of extractives reached 16.1%, which is similar to the extractives content of many tropical species. Mass losses of the virulence controls ranged from 48.9 % for *T. versicolor* to 50.2% for *P. sanguineus* for beech and 40.6% for *R. placenta* and 48.5% for *C. puteana* for pine sapwood (Tab. 2). To be valid, the European standard EN 113 requires minimum WL of 30%. All fungi tested met this requirement. Mass losses of all non-extracted heartwood blocks of *C. edulis* were less than 2%, regardless of the fungus used indicated that this species is resistant to attack by white or brown rot (Tab. 3).

Natural resistance of wood blocks against fungal attack. The moisture content of the blocks ranged from 20.8 to 53.7%, indicating that conditions were generally suitable for wood degradation (Tab. 4). The results also indicated that extracted wood absorbed more moisture showing that the extractives influenced wood moisture content. Steric hindrance and hydrophobic character of extractives may explain the higher water content of extracted samples.

Tab. 1. Extractives recovered from *C. edulis* heartwood sawdust with solvents with increased polarity

| Solvent | Yields (%) ^a |
|-----------------|-------------------------|
| Dichlorométhane | 1.1 ± 0,2 |
| Acetone | 8.5 ± 0,2 |
| Toluène/éthanol | 2.9 ± 0,4 |
| Water | 3.6 ± 0,2 |
| Total | 16.1±1 |

^a Values represent means of 3 replicates ± standard deviation.

Tab. 2: Corrected mass loss of *C. edulis* wood blocks after 16 weeks exposure to different fungi

| Sample | ML _{corrected} (%) ^a | | | |
|----------------------------|--|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | <i>Trametes versicolor</i> | <i>Pycnoporus sanguineus</i> | <i>Rhodonia placenta</i> | <i>Coniophora puteana</i> |
| Beech control | 48.9 ± 3 | 50.2 ± 9.5 | - | - |
| Pine control | - | - | 40.6 ± 7.5 | 48.5 ± 8.3 |
| <i>C. edulis</i> | 1.3 ± 0.4 | 1.28 ± 0.9 | 0.4 ± 0.1 | 0.5 ± 0.1 |
| Extracted <i>C. edulis</i> | 19.8 ± 0.9 | 17.5 ± 0.9 | 10.8 ± 0.9 | 12.8 ± 0.3 |

^a Values represent means of 3 replicates ± standard deviation.

Tab. 3: Classification of durability based on EN 350 (2016).

| Sample | <i>T. versicolor</i> | <i>P. sanguineus</i> | <i>R. placenta</i> | <i>C. puteana</i> |
|----------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| <i>C. edulis</i> | 1 (x=0.02) | 1 (x=0.02) | 1 (x=0.01) | 1 (x=0.01) |
| Extracted <i>C. edulis</i> | 3 (x=0.40) | 3 (x=0.35) | 2 (x=0.27) | 2 (x=0.26) |

^a 1= Very Durable; 2= Durable; 3= Moderately Durable; 4= Weakly Durable; 5= Non Durable

Tab. 4: Average moisture content of wood blocks after 16 weeks of exposure to a fungal attack

| Sample | Moisture content (%) ^a | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| | <i>T. versicolor</i> | <i>P. sanguineus</i> | <i>R. placenta</i> | <i>C. puteana</i> |
| Beech control | 50.3 ± 10.7 | 51.3 ± 4.9 | - | - |
| Pine control | - | - | 49.0 ± 5.3 | 53.7 ± 6.7 |
| <i>C. edulis</i> | 27.4 ± 0.9 | 27.1 ± 1.1 | 20.8 ± 1.0 | 25.7 ± 1.8 |
| Extracted <i>C. edulis</i> | 45.0 ± 4.4 | 40.9 ± 3.6 | 32.7 ± 8.0 | 43.5 ± 7.7 |

^a Values represent means of 3 replicates ± standard deviation

The GC-MS analysis is shown in Tab. 5

Tab. 5: Compounds identified by GC-MS and their relative abundance relative to Total Ion Current (TIC)

| Solvent | Retention time (min) | Compound | Abundance(%) |
|-----------------|----------------------|--------------------|--------------|
| Dichloromethane | 22.64 | Tetracosanoic acid | 20 |
| | 25.31 | Hexacosanoic acid | 54 |
| | 27.68 | Docosanoic acid | 5 |
| | 29.68 | Unknown | 11 |
| | 33.74 | Unknown | 11 |
| Acetone | 16.09 | Gallic acid | 53 |
| | 20.31 | Unknown | 3 |
| | 21.38 | Unknown | 4 |
| | 22.73 | Unknown | 6 |
| | 24.46 | Unknown | 3 |
| | 28.22 | Ellagic acid | 30 |
| Toluene/ethanol | 16.09 | Gallic acid | 20 |
| | 28.29 | Ellagic acid | 80 |

Inhibition of fungal growth by extracts. Fractions extracted with dichloromethane had lower antifungal properties as demonstrated by the weak inhibition of fungal development (Fig 5). Acetone, toluene/ethanol and water extracts presented significant antifungal properties. Growth of brown rot fungi began only on the sixth day with *R. placenta* and on the eighth day for *C. puteana* at 500 ppm concentrations. The higher concentrations (1000 ppm) completely inhibited mycelial growth. *P. sanguineus* did not start growing until the fifth day at 500 ppm and the sixth day at 1000 ppm. *T. versicolor* growth at 500 ppm and 1000 ppm started on the third day. Acetone, toluene/ethanol and aqueous fractions inhibited growth of the brown rot fungi more than the white rot fungi. Oxidizing enzymes such as laccases and peroxidases excreted by white rot fungi may be capable of degrading phenolic compounds such as extractive substances.

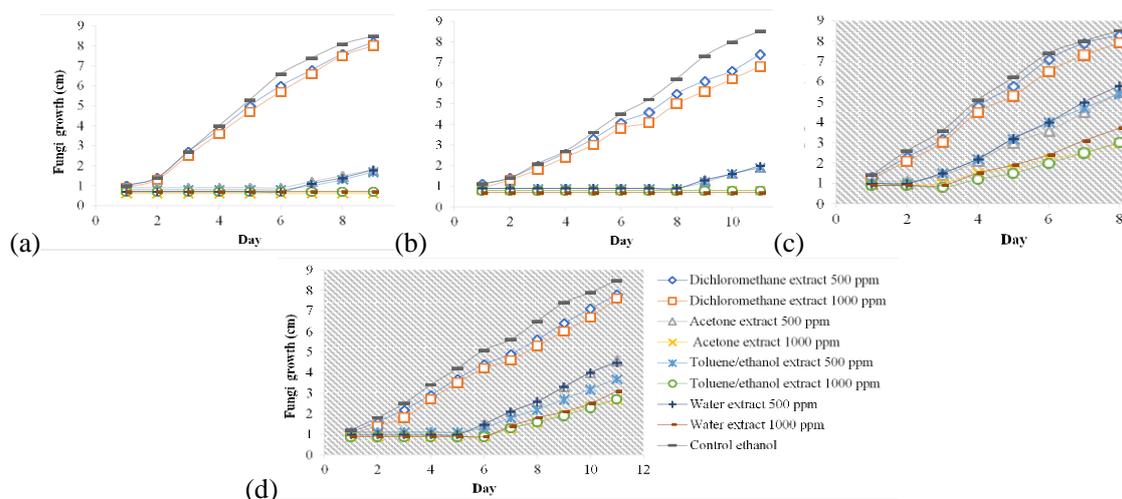


Fig 5. Activity of extracts on the growth of the different fungi:

(a) *Rhodonia placenta*; (b) *Coniophora puteana*; (c) *Trametes versicolor*; (d) *Pycnoporus sanguineus*.

Conclusions

The effect of extractives on the natural durability of *C. edulis* baill was studied in Petri dishes on extracts free or not heartwood blocks exposed to different brown rot and white rot fungi. Mass losses recorded on the extracted blocks were much greater than those measured on the non-extracted blocks indicating clearly the effect of extractives on wood natural durability. With mass losses lower than 2% after 16 weeks exposure to the fungi, this species can be classified as “very durable”, allowing to design utilisation as construction wood for indoors or outdoors applications by local populations as an alternative to wood shortage in Gabon. Growth inhibition tests have shown that at concentrations above 500 ppm, most of the extracts presented an important fungistatic effect on the growth of white rot and brown rot fungi and completely inhibited the last ones growth inhibition at 1000 ppm. GC/MS and FTIR analysis indicated the presence of different polyphenolic compounds like gallic acid, ellagic acid and tannins, which may explain in great part natural durability of this species to fungi.

References

- AGEOS (2016) Report on the state of satellite coverage of the Gabonese forest heritage. Agence Gabonaise d’Etudes et d’Observations Spatiales/Gabonese Agency for Space Studies and Observations, Libreville
- Aloui F, Ayadi N, Charrier F, Charrier B (2004) Durability of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) against white rot fungi (*Coriolus versicolor*): relations with phenol extractives. Holz Roh Werkst 62:286-290.

- Amusant N, Moretti C, Richard B, Prost E, Nuzillard M, Thévenon MF (2007) Chemical compounds from *Eperua falcata* and *Eperua grandiflora* heartwood and their biological activities against wood destroying fungus (*Coriolus versicolor*). Holz Roh Werkst 65:23–28.
- Antwi-Boasiako C, Barnett JR, Pitman AJ (2010) Relationship between total extractive content and durability of three tropical hardwoods exposed to *Coriolus versicolor* (Linnaeus) Quelet. J Indian Acad Wood Sci 7:9–13.
- Antwi-Boasiako C, Pitman AJ (2009) Influence of density on the durabilities of three Ghanaian timbers. J Sci Technol 29:34–45.
- Bopenga Bopenga CSA (2020) Valorisations potentielles des substances extractibles et étude de la composition chimique en relation avec la durabilité naturelle du noisetier du Gabon: *Coula edulis baill*. Thesis, PhD. University of Lorraine. LERMaB. Faculty of Technological Sciences.
- Bopenga Bopenga CSA, Meyo Degboevi H, Candelier K, Edou Engonga P, Dumarçay S, Thévenon MF, Gérardin Charbonnier C, Gérardin P (2020b) 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.
- Bopenga Bopenga CSA., Dumarçay S, Edou Engonga P, Gérardin P (2020a) Relationships between chemical composition and decay durability of *Coula edulis* Baill as an alternative wood species in Gabon. Wood Science and Technology. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01158-5>
- Cirad (2008) Technical sheet for *Coula edulis*. File n° 197. In: Gérard J, Guibal D, Beauchêne J et al (eds) Tropix 6.0. Technological characteristics of 245 tropical species. Cirad, Montpellier
- Guilley E, Charpentier JP, Ayadi N, Snackers G, Nepveu G, Charrier B (2004) Decay resistance against *Coriolus versicolor* in Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.): analysis of the between-tree variability and correlations with extractives, tree growth and other basic wood properties. Wood Sci Technol 38:539–554.
- Harborne BJ, Williams AC (2000) Review in advances in flavonoids research since 1992. Phytochemistry 55:481–504.
- Hillis WE (1972) Formation and properties of some wood extractives. Phytochemistry 11:1207–1218
- Huang Z, Hashadi K, Makino R, Kawamura F, Kuniyoshi S, Ryuichiro K, Ohara S (2009) Evaluation of biological activities of extracts from 22 African tropical wood. J Wood Sci 55:225–229.
- Kilic A, Niemz P (2012) Extractives in some tropical woods. Eur J Wood Prod 70:79–83.
- Moupela C et al (2010) African Hazel tree (*Coula edulis* Baill), a ignored forest non wood product. Biotechnol. Agron. Soc. Environ 5:451-461.
- Moupela C et al (2013) *Coula edulis* Baill dissemination attempts by seeding and air layering, and its domestications perspectives. Bois et Forêts des Tropiques 318:3-13.
- Rowell RM, Pettersens R, Han JS, Rowell JS, Tshabalala MA (2005) Cell wall chemistry, In: Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton London New York, Taylor & Francis 35:72.

Estimation des transferts hygrothermiques dans une cellule-test en rondins

MEDJELEKH Dalel¹, ULMET Laurent², DUBOIS Frédéric²

¹Université Badji Mokhtar, Département d'architecture, 24000 Annaba, Algérie

²Université de Limoges, Laboratoire de Génie civil et Durabilité LGC2D, 19300 Egletons, France

dalel.medjelekh@yahoo.fr

Mots clés : transferts hygrothermiques ; expérimentation ; cellule-test en rondins ; bois massif ; climat d'Egletons ; modèle thermique.

Contexte et objectifs

Face à la problématique énergétique actuelle, les enveloppes en bois constituent un enjeu primordial et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. Le matériau bois présente de nombreux atouts : matière première renouvelable, déchets de chantier réduits, énergie grise faible, fixation du CO₂, etc. En plus, ce matériau est hygroscopique, apte à fixer l'humidité. Il a bien démontré sa capacité à améliorer le confort thermique (Raji 2006), la consommation énergétique (Pickett 2003) et surtout la régulation de l'humidité intérieure dans les bâtiments (Hameury 2005).

A cette fin, et dans le cadre des travaux de thèse (Medjelekh 2015), une étude des transferts hygrothermique au niveau d'une fuste, une cellule test en rondins de douglas, a été réalisée. Le but étant d'évaluer les effets de ce type d'enveloppes de bois massif dans le confort thermique et la consommation énergétique sous les aléas climatiques d'Egletons (France).

Matériel et méthode

Présentation de la cellule-test en rondins

La fuste est un bâtiment de petite taille, de volume intérieur 20 m³ dont l'enveloppe a été réalisée en parois de rondins (bois empilés) écorcés de douglas à l'échelle 1. Le diamètre moyen des rondins est de 40 cm. La cellule-test a pour seule ouverture une porte d'entrée isolante (Fig.1). Une toiture végétalisée débord de 50 cm sur les rondins permettant de limiter les apports solaires d'été, en orientation sud. Les flux thermiques parasites, échanges par la toiture ou le plancher et entre les rondins, ont été minimisés en renforçant l'isolation de ces éléments.



Fig. 1 : Vues de face de la cellule-test en rondin

Instrumentation

La Fig. 2 montre l'appareillage de mesure de la fuste. En plus des capteurs utilisés pour la mesure de la température et l'hygrométrie de l'air, les grandeurs énumérées ci-dessous ont été mesurées au niveau de la fuste. Les acquisitions ont été espacées de 15 minutes :

- Températures de surface intérieure et extérieure des rondins (plan médian du rondin et au voisinage immédiat de la gorge) en diverses orientations (sonde à film ZTA685AK, Ahlborn) ;
- Température de la gorge au cœur de la laine de mouton (sonde PT100) ;
- Teneur en eau du bois près des surfaces intérieure et extérieure, estimée à partir d'une mesure de la conductivité électrique du matériau (FHA636MF, Ahlborn).

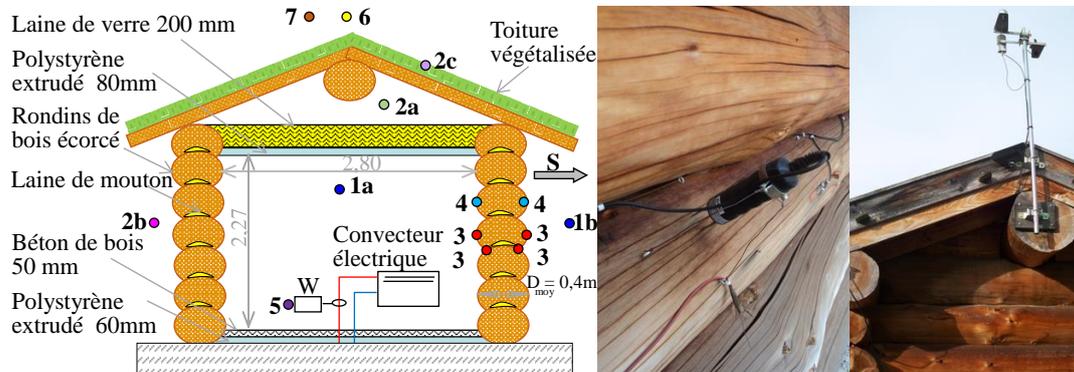


Fig. 2 : Appareillage de la cellule-test en rondins, capteurs de contact et station météo

Une caméra infrarouge FLIR SC-7600 a également été utilisée pour détecter les défauts d'isolation et mesurer la température surfacique des murs de la cellule-test (Fig. 3). La caméra est d'une résolution de 640*512 pixels, arbore une large bande de 1,5 à 5,1 μm . Elle est sensible à 15 μm de longueur d'onde et 20 mK (0,02 °C) de température. La fréquence d'acquisition de l'appareil est d'une minute, dont la précision de mesure est estimée à $\pm 1^\circ\text{C}$ dans la plage 5 à 100°C et $\pm 1\%$ à plus de 100°C. Le matériel n'étant pas protégé contre le rayonnement solaire, les mesures ont été effectuées sur des durées limitées (fin d'automne, en fin de journée) à condition de différence de température de plus de 10°C entre la cellule-test chauffée et l'extérieur.



Fig. 3 : Caméra infrarouge FLIR 7600 utilisée (Source : www.flir.com)

Résultats et discussion

Température de l'air et de surface

La température ambiante dans la fuste se trouve dans les limites du confort thermique, selon la norme Européenne NE15251 (BSI, 2008) (Fig.4). L'effet de l'inertie thermique est bien apparent avec des amortissements modérément bons jusqu'à 7,8°C max, mais des déphasages courts (1h15 à 3h15, Fig.5). Les températures surfaciques internes, en creux et bosses du rondin sont étroitement proches de la température intérieure. Tandis que les températures surfaciques externes montrent des écarts avec la température extérieure jusqu'à 5°C. La forte épaisseur de « 40 cm » des rondins et la faible diffusivité thermique du bois, causent une très faible capacité

de transfert de chaleur. Ainsi, la surface des rondins et la température de l'ambiance sont relativement stables dans le temps.

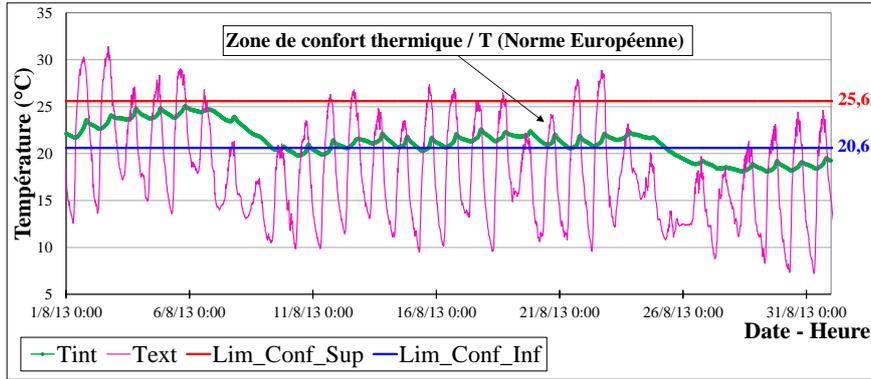


Fig.4 : Températures et limites du confort thermique / T « fuste, mois d'août »

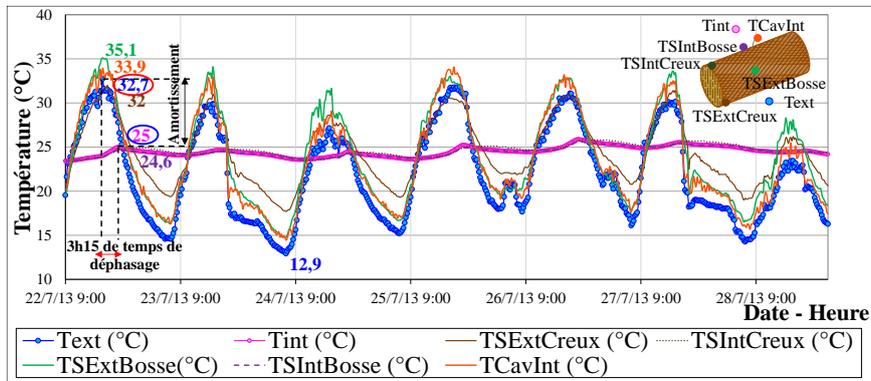


Fig. 5 : Variation de la température de l'air et surfacique « fuste, semaine d'été »

En hiver et en absence du chauffage, la fuste assure également des températures très stables, toutefois faibles (Fig.6). Si le bois a une faible conductivité thermique qui empêche la chaleur de pénétrer dans la structure en été, il s'agit d'un facteur limitatif pour des fins de stockage thermique en hiver. Des températures surfaciques externes jusqu'à 46,6 et 44,7 °C ont été notées respectivement en bosse et en creux du rondin. Ces extrêmes sont dus à la charge thermique maximale en journées ensoleillées produite après 13h. En revanche en présence du chauffage, une puissance moyenne de 391,21W a été utilisée pour assurer une température ambiante moyenne 21,5°C. Notant qu'une bonne cohérence a été trouvée entre le bilan énergétique global de la fuste et les consommations théoriques estimées sous l'hypothèse d'une succession de régimes permanents (calcul mené par éléments finis, donnant pour le mur un coefficient : $U=0.47 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) (Ulmet et al, 2009).

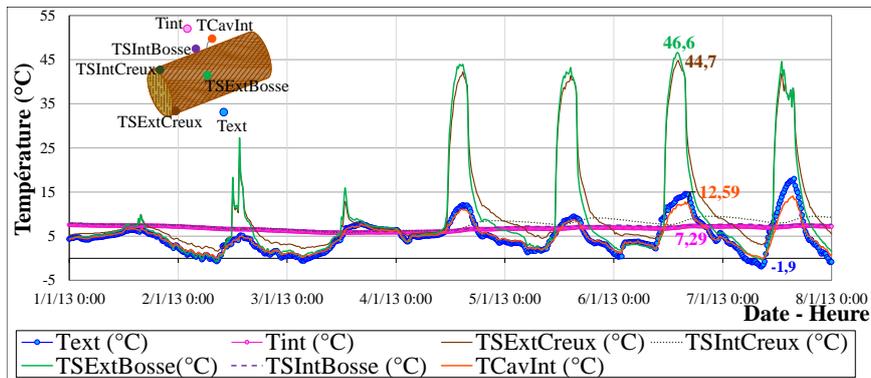


Fig. 6 : Variation des températures de l'air, surfacique et en cavité : fuste, semaine d'hiver

Les clichés pris par la caméra infra-rouge montrent que les rondins inférieurs affichent les plus faibles températures (Fig.7). L'air chaud étant moins dense et léger monte, causant l'échauffement des rondins supérieurs. Les bosses des rondins du fait plus exposées, sont plus froides que les creux protégés et isolés par la laine de mouton. Comme c'est le cas des constructions en bois, la fuste ne présente pas de ponts thermiques importants.

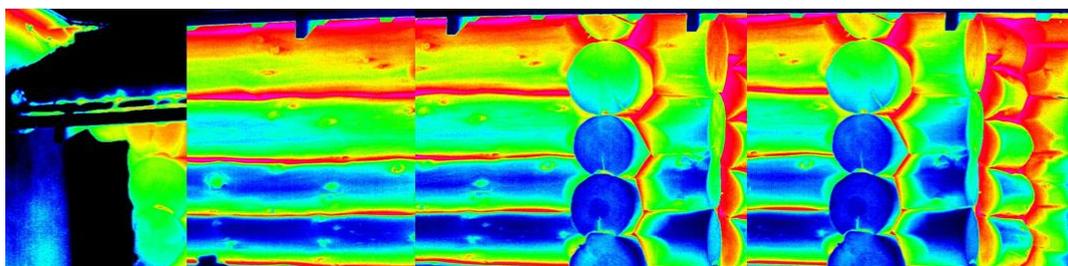


Fig. 7 : Cliché de la température superficielle extérieure au niveau des rondins de la fuste, pris par la caméra infra-rouge, le 10/11 à 17h50.

Température dans la paroi

Lors d'une séquence quotidienne, la profondeur de pénétration de la chaleur dans un matériau en bois a été estimée autour 6,5 cm. Cette épaisseur active représente la distance à laquelle la variation de la température est environ un tiers de la variation du climat intérieur pendant la journée (Hameury, Lundström, 2004). Par transposition au cas de la fuste en été, avec 6,5 cm d'épaisseur active, la chaleur est transférée de 1,2°C chaque 1cm puis se stabilise. 7,8 °C d'amortissement de l'onde thermique fait environ le un tiers de 25 °C de température intérieure et peut confirmer cette épaisseur de couche active. Cette constatation a été vérifiée par un calcul du transfert thermique en régime dynamique sous Excel (Tab. 1). Selon notre modèle, la paroi n'est concernée par le transfert de chaleur au-delà de 25 cm d'épaisseur (fig.8).

Tab. 1 : Paramètres d'entrée du modèle de transfert thermique

| Données matériau : Bois de douglas | | Température (°C) | | Paramètres de discrétisation | |
|---|----------|-----------------------|------|------------------------------|--------|
| λ (W/(mK)) | 0,15 | $T_{i\text{ moy}}$ | 25 | $pas \Delta x$ (m) | 0,04 |
| ρ (kg/m ³) | 520 | $T_{e\text{ min}}$ | 17,2 | $pas \Delta t$ (s) | 60 |
| C (J/(kg.K)) | 1600 | $T_{e\text{ max}}$ | 32,7 | m | 147,91 |
| <i>Albédo</i> | 0,48 | Heure max (HH:MM) | | 15 :45 | |
| a | 1,80E-07 | azimut paroi (°) | | 00 | |
| $R_{s\text{ int}} = 1/h_i$ (m ² K/W) | 0,13 | Inclinaison paroi (°) | | 90 | |
| $R_{s\text{ ext}} = 1/h_e$ (m ² K/W) | 0,04 | Latitude | | 45°24' | |

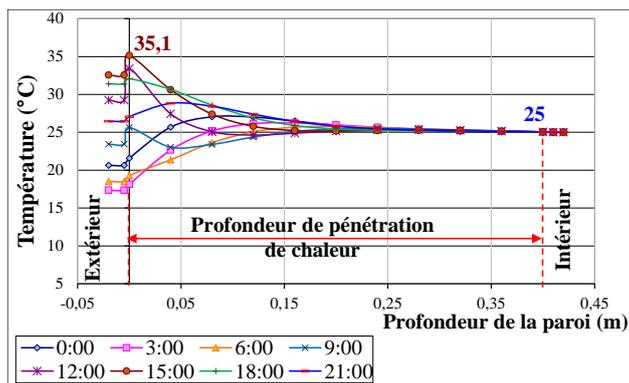


Fig. 8 : Profils de la température dans la paroi du rondin à différentes heures (du 22 juillet)

Humidité de l'air et en cavité

La fuste fournit de plus une humidité relative très stable (60 à 62,7%HR) et dans les limites du confort thermique (ASHRAE, 2010) (Fig. 9, 10). Par ailleurs, lors des fluctuations journalières, la profondeur de pénétration de l'humidité dans le matériau bois a été estimée autour de 3 mm (Simonson et al 2001). Dans le cas de la fuste, si l'humidité est amortie à 40 %HR, seuls les trois premiers millimètres de 40 cm de diamètre en sont responsables.

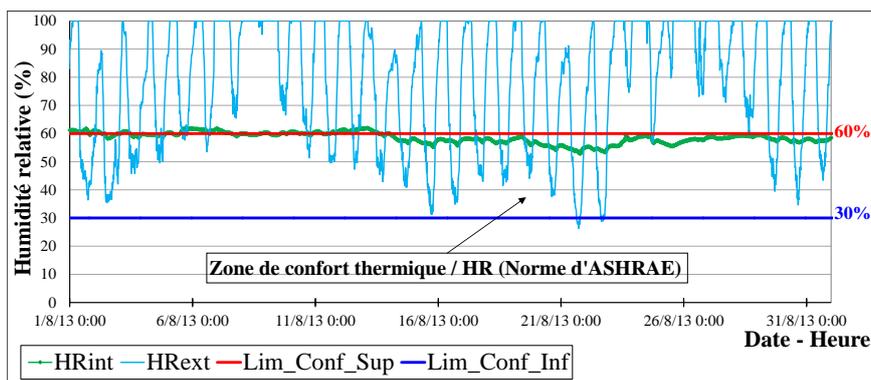


Fig. 9 : Humidités relatives et limites du confort thermique /HR « fuste, mois d'août »

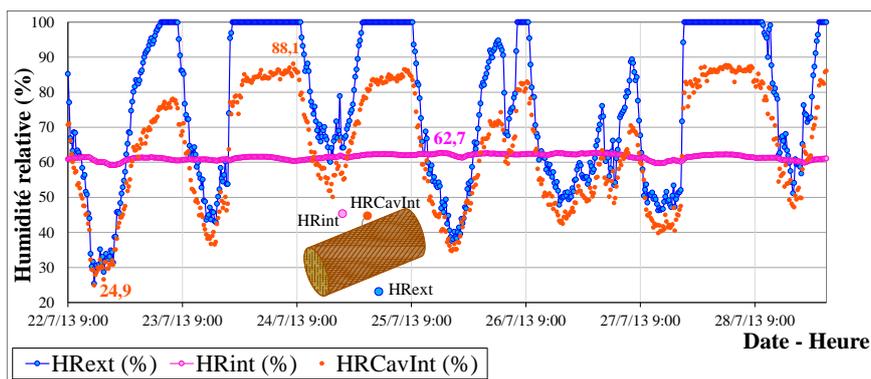


Fig. 10 : Variation de l'humidité relative de l'air et en cavité « fuste, semaine d'été »

Conclusion et perspectives

Dans le but d'évaluer les transferts hygrothermique au niveau des enveloppes en bois, ce travail a présenté une étude sur une « fuste » ou cellule-test en rondins de douglas, exposée aux aléas climatiques d'Egletons. Suivant les résultats de la campagne de mesure et les expérimentations menées, ainsi que le modèle de transfert thermique en régime dynamique établi, le sujet de stockage de chaleur et d'humidité dans la construction en bois massif a été discuté.

Ce matériau isolant, structural et naturel, demeure un choix sensé d'une technique traditionnelle de construction qui allie la beauté, l'authenticité, solidité et sécurité. Mais, une grande ambiguïté demeure encore sur son efficacité énergétique (Raji 2006, Pickett 2003) et sur sa conformité avec les exigences réglementaires. Si la RT2020 prévoit que les bâtiments seront obligatoirement à énergie positive, la construction en rondins est encore loin d'assurer une consommation d'énergie primaire de 30 kWh/m²/an maximum, exigée par la RT2015.

Bien qu'il ait été démontré par rapport au climat d'Egletons et à travers les mesures thermo-hydrauliques et les tests d'isolation par caméra infrarouge effectués, qu'elle assure le confort hygrothermique estival et réduit l'amplitude des fluctuations de l'humidité relative l'hiver comme l'été. Des amortissements de l'onde thermique jusqu'à 7,8°C et de l'humidité à 40 %HR ont été enregistrés. Selon le modèle, toute l'épaisseur de la paroi n'est concernée par le transfert de chaleur, mais les premiers centimètres de 6,5 cm sont les plus actifs.

Cette étude de la fuste constitue une première étape vers la caractérisation hygrothermique de l'enveloppe en bois massif. Une modélisation de transfert couplé, chaleur et masse de son comportement thermo hydrique est également à envisager.

Références

ASHRAE (2010), INTERPRETATION IC 55-2004-3 OF ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE; 2010.

BS EN 15251: 2007 (2008), Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. British Standards Institute, London.

Kunzel H. M, Holm A, Sedlbauer K, Antretter F, Ellinger M (2004), Moisture buffering effect of interior linings made from wood or wood based products, IBP Report HTB-04/2004/e.

Hameury S (2005), Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study", Building and Environment 40, 1400–1412.

Hameury S, Lundström T (2004), Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign, Energy and Buildings 36, 281–292.

Medjelekh D (2015), Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques, Thèse de doctorat, Universités de Limoges / Constantine, Spécialité : Génie civil / Architecture Bioclimatique, 300 p.

Pickett R (2003), The energy performance of log homes. Documented energy-efficiency and thermal mass benefits; Technical Committee of the Log Homes Council, Building Systems Councils; National Association of Home Builders©.

Raji S (2006), Caractérisation hygrothermique par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, Spécialité : Sciences du bois.

Simonson C J, Salonvaara M, Ojanen T, Improving indoor climate and comfort with wooden structures, VTT Publication 431, VTT Technical Research Centre of Finland, 200 p.

Ulmet L, Merakeb S, Dubois F, Sauvat N (2009), Etude expérimentale et numérique du transfert hygrothermique des constructions en rondins de douglas, VII^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes CIFQ 2009, 18-20 mai 2009, Lille.

Évaluation de la capacité d'un robot poly-articulé 6 axes en usinage du bois

NASRI Linda¹, CURTI Rémi¹, EYMA Florent¹

¹Université Paul Sabatier, Institut Universitaire de Technologie, Département GMP,
Laboratoire Institut Clément Ader, Tarbes, France.

linda.nasri@iut-tarbes.fr

Mots clés : Usinage ; MDF ; Robot ; Qualité dimensionnelle et géométrique ; Etat de surface

Contexte et objectifs

Dans un monde en constante évolution, la robotique industrielle émerge comme l'une des technologies les plus influentes. 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). Cependant, les chiffres indiquant l'utilisation des robots industriels à travers le monde, dans les procédés de travail du bois, sont modestes (Landscheidt et al. 2017). En France, la robotique industrielle est considérée comme une des clés de la compétitivité future et de la transformation de l'industrie. Plusieurs initiatives nationales et régionales ont été mises en œuvre pour stimuler le développement de ce secteur. Cette volonté a été réaffirmée dans le plan d'investissement France 2030, dont une enveloppe est prévue pour la filière industrielle bois et pour la robotisation. Dans le but de valoriser au maximum cette dynamique de transition pour la filière, évoluant dans la 2^{nde} région forestière de France, nous souhaitons répondre à ces nouveaux enjeux scientifiques.

Il est complexe d'obtenir des états de surface satisfaisants en tous points pendant l'usinage d'un matériau fortement anisotrope et hétérogène tel que le bois. Les états de surface étant, entre autre, particulièrement sensibles à la direction du fil du bois usiné (Goli et al. 2016, Curti et al. 2018, Goli et al. 2018). L'état de surface du bois usiné dépend de nombreux facteurs : des paramètres liés aux conditions de coupe, des paramètres liés à la géométrie de l'outil et d'autres liés aux matériaux. Dans la littérature, plusieurs études se sont focalisées sur l'effet de ces paramètres sur l'état de surface en usinage par machine à commande numérique (Computer Numerical Control / CNC). Mais l'effet de ces paramètres sur l'état de surface en usinage robotisé n'a pas encore été clairement identifié. La réponse aux différents enjeux associés à l'intégration de cette nouvelle technologie dans les industries du bois ne pourra pas se faire sans une évaluation précise de la capacité du robot à réaliser des opérations d'usinage conformes à des cahiers des charges stricts. Cette campagne vise donc à (i) évaluer la capacité d'un robot industriel à effectuer des opérations d'usinage en contrôlant et en analysant la qualité dimensionnelle et géométrique d'échantillons de bois en MDF (Medium Density Fiber), i.e. un panneau de fibres de densité moyenne après usinage, (ii) comparer l'état de surface obtenu après un usinage avec une machine CNC et celui obtenu après un usinage avec un robot.

Matériels et méthodes

Dans le cadre de cette campagne initiale, le matériau usiné est du MDF. Les échantillons, mesurant chacun 200 x 180 x 19 mm³ (Fig. 1). Pour l'usinage, nous avons utilisé un robot à 6 axes (Kuka Kr 70), équipé d'une électrobroche d'usinage (HSD MT 1090 HSK A40), ainsi qu'une machine CNC Dubus à 3 axes. Sur le robot d'usinage, 5 positions d'usinage 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 échantillons. Sur la machine CNC, 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 échantillons ont été usinés, dont 25 échantillons à l'aide du robot et 5 échantillons avec la machine CNC. Les échantillons ont tous été usinés avec les mêmes paramètres de coupe, caractéristiques d'un usinage en ébauche soignée (Tab. 1 et 2).

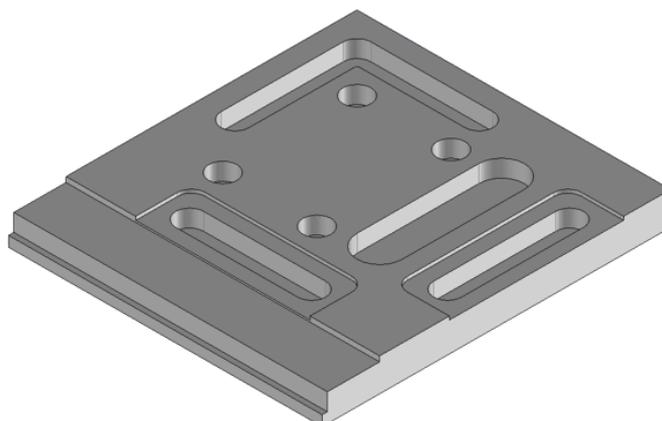


Fig. 1: Modèle 3D de la pièce test usinée

Tab. 1 : Paramètres de coupe

| Paramètre (unité) | Valeur |
|--|--------|
| Vitesse de rotation (tr/min) | 15000 |
| Vitesse de coupe (m/s) | 12,57 |
| Vitesse d'avance (m/min) | 10 |
| Vitesse d'avance en plongée (m/min) | 0,5 |
| Profondeur de passe axiale en surfacage (mm) | 3 |

Tab. 2 : Caractéristiques de l'outil

| Paramètre | Valeur |
|--------------------|-----------------------------|
| Matériau | Acier rapide (8% de cobalt) |
| Diamètre(mm) | 16 |
| Nombre de dents | 2 |
| Angle d'hélice (°) | 30 |
| Coupe au centre | Oui |

Après usinage, les performances du robot ont été évaluées à travers trois types de contrôles sur les pièces usinées (Fig. 2). Le premier correspond à un contrôle dimensionnel, qui vise à déterminer l'écart entre les dimensions nominales des échantillons et leurs dimensions réelles après usinage. Le second correspond à un contrôle géométrique, permettant d'évaluer des spécifications géométriques telles que la planéité, le parallélisme, la perpendicularité et la localisation d'éléments usinés. Ces contrôles ont été effectués à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (GLOBAL Lite). Nous avons ensuite comparé les états de surface obtenus avec le robot à ceux obtenus avec la machine CNC 3 axes. Plusieurs paramètres d'états de surface ont été mesurés à cette fin à l'aide d'un perthomètre Mahr (MarSurf CM mobile).

Résultats

Ces essais menés sur l'usinage de panneau de fibres de densité moyenne (MDF), nous ont permis d'évaluer la précision et la répétabilité du robot d'usinage, comparativement à une machine CNC :

- Les écarts entre les dimensions nominales des échantillons et celles réellement obtenues après usinage ont pu être quantifiés ;
- La géométrie obtenue pour différentes positions du robot (contrôles de parallélisme, de perpendicularité, défauts de localisation, ...) a pu être caractérisée ;
- Les états de surface obtenus en surfacage en bout et en roulant ont pu être évalués.

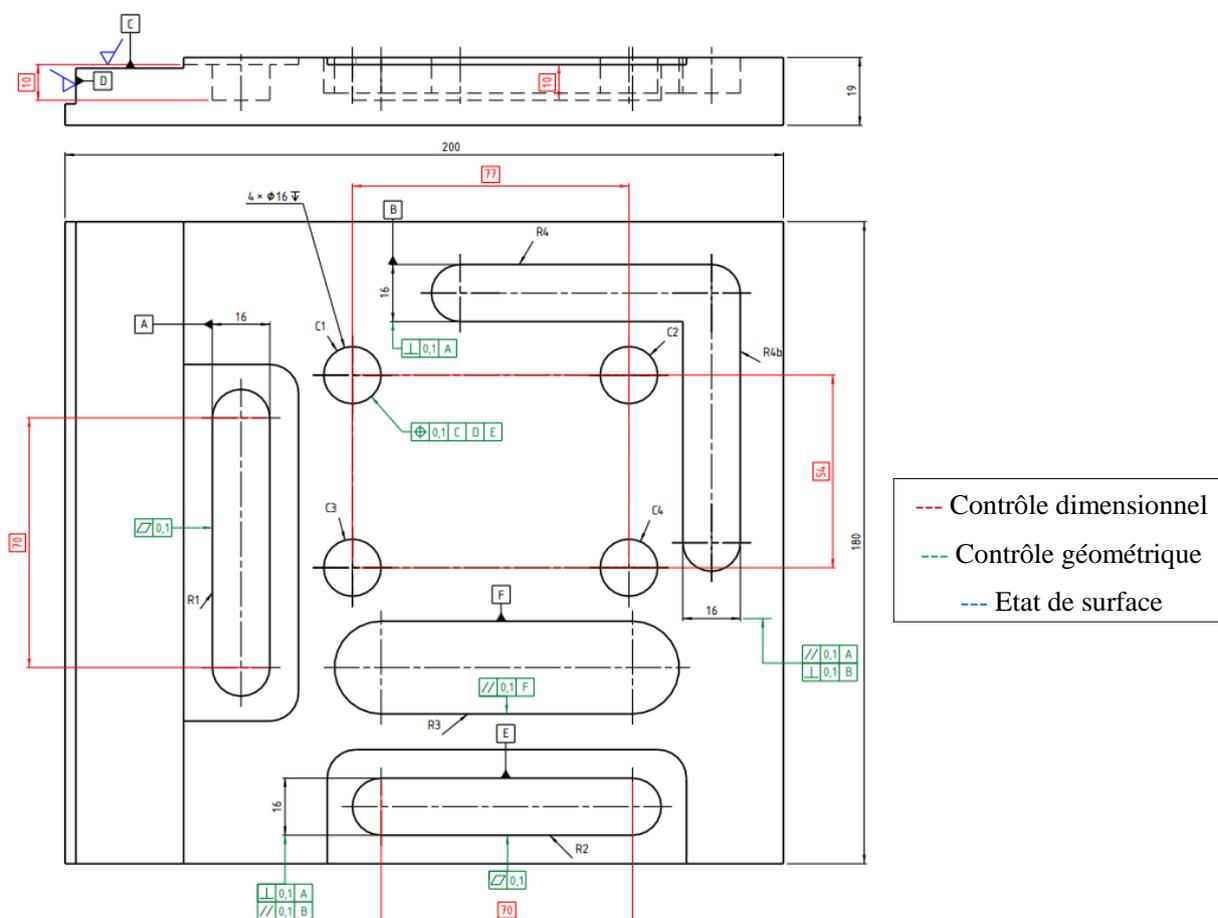


Fig. 2 : Dimensions, spécifications géométriques et états de surface contrôlés

Conclusion et perspectives

Ces essais ont pour objectif d'évaluer les capacités du robot à usiner le MDF dans des conditions de coupe « standard » sur un matériau quasiment isotrope et homogène. Il faudra, par la suite, vérifier le comportement du robot sur du bois massif, bien plus anisotrope et entraînant des efforts de coupe plus variables en cours d'opération ; mais aussi travailler sur le lien entre les conditions de coupe appliquées, les efforts de coupe et les états de surface obtenus.

Remerciements

Nous souhaitons remercier l'agglomération de Tarbes Lourdes Pyrénées, l'IUT de Tarbes et la Région Occitanie pour leur support financier.

Références

Curti R, Marcon B, Denaud L, Collet R (2018) Effect of grain direction on cutting forces and chip geometry during green beech wood machining, *BioResources*, 13(3), pp. 5491–5503. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.5491-5503>

Goli G, Curti R, Marcon B, Scippa A, Campatelli G, Furferi R, Denaud L (2018) Specific Cutting Forces of Isotropic and Orthotropic Engineered Wood Products by Round Shape Machining, *Materials*, 11(12), p. 2575. <https://doi.org/10.3390/ma11122575>

Goli G, Sandak J (2016) Proposal of a new method for the rapid assessment of wood machinability and cutting tool performance in peripheral milling, *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), pp. 867–874. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1053-y>

Iglesias I, Sebastián MA, Ares JE (2015) Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential, *Procedia Engineering*, 132, pp. 911–917. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.577>

Landscheidt S, Kans M, Winroth M (2017) Opportunities for Robotic Automation in Wood Product Industries: The Supplier and System Integrators' Perspective, *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.231>

Assessment of fungus and termite resistance in four Eucalyptus species cultivated in Tunisia

ELAIEB Mohamed^{1*}, BEN AYED Sarra¹, KACHOURI Hbib², KHOUJA Mariem¹, DUMARCAY Stéphane³, DE FREITAS HOMEN DE FARIA Bruno^{4,5}, THEVENON Marie-France⁵, GERARDIN Philippe³, CANDELIER Kévin⁵

¹ INRGREF, University of Carthage, B.P. 10, 2080 Ariana, Tunisia.

² Régie d'Exploitation Forestière (REF), Ministère d'agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche, 30 rue Alain Savary, Tunis, Tunisie.

³ LERMAB, LERMAB the University of Lorraine, Faculty of Science and Technology, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France.

⁴ Federal University of Viçosa, Department of Forestry Engineering, Viçosa, Brazil

⁵ CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France. BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

*elayeb.mohamed@ingref.ucar.tn
ayeb2002@yahoo.fr

Key words: Extractive's composition; GC-MS; Natural durability; Screening tests; Tunisian Eucalyptus.

Context and objectives

Eucalyptus trees have been adapted to the Tunisian climate. Now, they need to be economically valued. Tunisian Eucalyptus have great technological properties allowing us to use them as wooden material. However, there is large variability in the natural durability between heartwood Eucalyptus spp. (Taylor et al. 2006). The wood sustainability assessment provides reliable parameters to predict the service life of wood-based products. This study aimed to evaluate the wood deterioration of four North Tunisian fast-growing Eucalyptus spp. exposed to basidiomycetes and termites. Then, these natural durability results were put in perspective with the extractive content and analysis.

Material and methods

Eucalyptus maidenii, *E. saligna*, *E. camaldulensis* and *E. gomphocephala* trees were collected from the arboretum of Souiniet, which is located in Ain Draham, region of Kroumirie, Tunisia (35°54' N; 8° 48' E). 5 trees/Eucalyptus genus without defects (cracks, biotic and abiotic alterations, etc.), with a good rectitude and with a great visual quality were picked for each studied Eucalyptus spp. The selected trees were 55–60 years old and their diameters [at 1.30 m at breast height (DBH)] comprised between 30 and 40 cm.

To perform durability tests, a wooden disk, 50 mm in thickness, was cut at tree DBH, for each selected tree. From each disk, 15 samples with surrounding dimensions of 30 × 10 × 5 mm³ (L × R × T) were randomly selected among the heartwood part: 12 samples to examine the fungal resistance and three samples to evaluate the termite resistance. For each of the Eucalyptus spp., 60 samples were submitted to fungal exposure [30 samples (12 × 5 wooden disk) for each tested fungus] and 15 samples to termite attacks.

Decay resistance was tested, against one brown rot (*Coniophora puteana* CP) and one white rot (*Trametes versicolor* CV), according to the main criteria of the EN 113-2 (2020), despite the fact that such an estimate is not very accurate for screening tests of 6 weeks.

Termite resistance non-choice tests were carried out against Eastern subterranean termites (*Reticulitermes flavipes*), according to the main criteria of the EN 117 (2013), except for the sample sizes and test duration (4 weeks).

Finally, all raw Eucalyptus wood sawdusts were extracted by Soxhlet apparatus, using a sequential extraction with dichloromethane (DCM) and acetone. The extractive yields were determined and their chemical compositions were analysed by GC-MS (Gas Chromatography coupled with Mass Spectrometry).

Results and discussion

Among the four Eucalyptus woods, *Eucalyptus gomphocephala* presents the highest decay and termite resistance. The four Eucalyptus wood species are classified as very durable against fungal degradation (Tab. 1) and durable against termite attacks, except for *Eucalyptus saligna* which is classified as sensible against termites.

Tab. 1: Durability classes of *E. saligna*, *E. maidenii*, *E. camaldulensis* and *E. gomphocephala* according to the XP CEN/TS 15083-1 (2006) and EN 117 (2013).

| Species | Fungal resistance (according to the EN XP CEN/TS 15083-1) | | | Termite resistance (according to the EN 117) | | Durability class |
|-------------------------|---|--|------------------|--|------------------|------------------|
| | <i>Coniophora puteana</i> (Brown rot) | <i>Trametes versicolor</i> (White rot) | Durability class | <i>Reticulitermes flavipes</i> (Eastern subterranean termites) | | |
| | Average value of WL (%) | Average value of WL (%) | | Survival rate (%) | Visual quotation | |
| <i>E. saligna</i> | 0.65 ± 1.05 | 2.04 ± 2.60 | 1 | 34.7 ± 12.03 | 3 | Sensible |
| <i>E. maidenii</i> | 0.17 ± 0.15 | 0.45 ± 0.27 | 1 | 13.33 ± 7.02 | 1 | Durable |
| <i>E. camaldulensis</i> | 0.23 ± 0.63 | 0.28 ± 0.25 | 1 | 14.00 ± 6.93 | 1 | Durable |
| <i>E. gomphocephala</i> | 0.06 ± 0.06 | 0.27 ± 0.21 | 1 | 12.67 ± 5.03 | 1 | Durable |

The natural durability of Eucalyptus is mainly caused by extractives, and a lot of compounds are involved (Gominho et al. 2001, Boa 2014). Antifungal and anti-termite properties of these compounds were put in perspective with the natural durability of wood. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analyses highlighted that Eucalyptus durability is mostly governed by gallic acid, fatty acid glycerides, fatty acid esters, phenolic compounds, sitosterol, catechin and ellagic acid (Tab. 2).

Tab. 2: Qualitative evaluation of the presence of chemical compounds with antifungal activities in the *E. saligna*, *E. maidenii*, *E. camaldulensis* and *E. gomphocephala* extracts.

| Species | Solvent used for extraction | Extractive contents (% w/w) | Presence of chemical compounds with anti-fungal and anti-termite activities | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---|------------|----------|--------------|
| | | | Gallic acid | Fatty acid glycerides and fatty acid esters | Sitosterol | Catechin | Ellagic acid |
| <i>E. saligna</i> | DCM | 1.20 | 0 | +++ | ++ | 0 | 0 |
| | Acetone | 2.60 | ++ | ++ | 0 | - | 0 |
| <i>E. maidenii</i> | DCM | 0.80 | 0 | ++ | - | 0 | 0 |
| | Acetone | 8.50 | +++ | + | 0 | 0 | + |
| <i>E. camaldulensis</i> | DCM | 0.30 | 0 | +++ | ++ | 0 | 0 |
| | Acetone | 5.80 | ++ | - | + | ++ | 0 |
| <i>E. gomphocephala</i> | DCM | 1.10 | 0 | +++ | ++ | 0 | 0 |
| | Acetone | 12.30 | +++ | - | 0 | ++ | ++ |

The high contents of gallic acid, fatty acid glycerides, fatty acid esters and phenolic compounds in the extractives conferred a high level of decay resistance (Durability class 1) to the four Eucalyptus wood. It is well known as the polyphenols protect the tree against microbiological, fungal and insect attacks (Metsämuuronen and Siren 2014). In addition, the tenors in sitosterol, catechin and ellagic acid of these extracts allowed to classify the four Eucalyptus spp. in the following order of durability (fungi and termites): *E. gomphocephala* > *E. camaldulensis* > *E. maidenii* > *E. saligna*.

Conclusion and perspectives

The results obtained through this study bring many new information about the relationships between extractive contents and compositions and decay and termite resistance levels of the four most common Tunisian Eucalyptus spp. The contents in total extractives of the studied Tunisian Eucalyptus seem to be correlated with their respective wood durability levels. While the literature gives us many results concerning the chemical composition of some Eucalyptus extractives, often closely related only to the paper industry, the present study identified several extractive compounds playing a role in wood durability (anti-fungal and anti-termite activities) and highlights their effects relating to the wood natural durability level. GC-MS analyses highlighted that the high contents of gallic acid, fatty acid glycerides, fatty acid esters and phenolic compounds in the four Eucalyptus extractives provided to the wood a high level of decay resistance (Durability class 1). In addition, the tenor's variations in sitosterol, catechin and ellagic acid, which also have anti-termite activities, allowed to classify the four Eucalyptus spp. These decay and termite-resistant of Tunisian Eucalyptus wood could be extensively used in some industrial processes such as pulp, paper, chipboard, plywood manufacturing and also wooden material and building structure, improving the economy of the wood sector in Tunisia.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the National Institute of Agricultural Engineering Research, Water and Forest (INRGREF) and the General Direction of Forestry (DGF) for their implications on this project.

References

- Boa AC (2014) Wood characterization of the upper half of the trunk of Eucalyptus grandis 3 Eucalyptus urophylla of 13 years trees for pulpwood. MS thesis. Federal University of Esp'irito Santo, Brazil. 92 pp. (In Portuguese with English abstract.)
- EN 113-2 (2020) Durability of wood and wood-based materials - Test method against basidiomycetes - Part 2: Determination of inherent or enhanced durability. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, p. 20.
- EN 117 (2013) Wood preservatives – Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (laboratory method). European committee for standardization. [https:// www.cen.eu](https://www.cen.eu).
- Gominho J, Figueira J, Rodrigues JC, Pereira H (2001) Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*). Wood and Fiber Science, 33(1): 3-8.
- Metsämuuronen S, Siren H (2014) Antibacterial compounds in predominant trees in Finland: review. Journal of Bioprocessing and Biotechniques, 4: 167, 13 pages.
- Taylor AM., Gartner B., Morrell JJ (2006) Effects of heartwood extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi. Journal of Wood Science, 52: 147–153.

Analyse de la complaisance du bois dans des essais de fluage multi-paliers

BONTEMPS Arthur^{1,2}, GODI Gaël¹, MOUTOU PITTI Rostand^{1,3}, FOURNELY Eric¹,
GRIL Joseph^{1,4}

¹Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

²Univ Lyon, ECAM LaSalle, LabECAM, 40 Montée Saint Barthélémy, Lyon Cedex 05, 69321, France

³CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

⁴Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000, Clermont-Ferrand, France
arthur.bontemps@ecam.fr

Mots clés : Fluage du bois, complaisance, Eurocode 5

Contexte et objectifs

Le fluage des éléments de structure en bois est un élément déterminant de la construction bois dans la mesure où il impacte drastiquement le dimensionnement et la durée de vie de la structure. Néanmoins, le fluage du bois est encore imprévisible tant il dépend de nombreux paramètres : teneur en eau initiale, variation d'humidité relative ou de température, niveau de chargement, angle de fil, etc. (Morlier et al. 2007).

Le dimensionnement des structures bois en France est défini par certaines dispositions de l'Eurocode 5, qui se sert essentiellement de deux facteurs pour inclure le fluage dans le calcul de flèche et de la résistance à long-terme : le k_{def} et le k_{mod} (AFNOR 2005). Autant ces facteurs sont relativement simples à utiliser pour des bureaux d'étude, autant ils sont très approximatifs et inadaptés dans certaines situations. Par exemple, lorsqu'un élément de structure en bois est chargé à une teneur en eau initiale supérieure à 20% et soumis à une classe de service 3, le k_{def} est augmenté de 1. Cette augmentation est critiquée et jugée arbitraire par la communauté des charpentiers traditionnels, qui s'accommode et même recherche encore le bois vert pour la construction (Bontemps 2023). Également, le choix du k_{def} est indépendant d'une éventuelle exposition au soleil ou de l'angle de fil, alors que ces éléments influent considérablement le fluage (Granello et Palermo 2019). Enfin, le facteur k_{def} ne tient pas compte des éventuelles réservations dans le bois, qui pourrait coupler le fluage et la fissuration (Jockwer et al. 2014).

Dans ce contexte, il paraît donc pertinent de réaliser des essais de fluage sur des poutres entaillées à l'échelle d'élément de structure en environnement variable, cas de figure où le k est lacunaire. Cet article présente l'analyse d'essais de fluage multi-paliers dans laquelle une tentative d'estimation de k_{def} est proposée.

Matériel et méthode

Essais de fluage multi-paliers sur des poutres entaillées soumises à un environnement variable

Des essais de fluage en flexion 4 points ont été réalisés dans le cadre d'une campagne expérimentale visant à déterminer le comportement à long-terme de poutres entaillées en sapin pectiné, soumises à un environnement extérieur et à différentes teneurs en eau initiales. Les poutres ont été chargées à des états partiellement séchés, dont à des teneurs en eau supérieures au point de saturation des fibres. Elles sont en dimensions d'emploi : $4000 \times 175 \times 63\text{mm}^3$. Le dispositif expérimental est montré en Fig. 1. Il est en environnement extérieur semi-abrité,

c'est-à-dire abrité de la pluie mais pas du rayonnement solaire. Le chargement appliqué consiste en des blocs de béton imperméables de 350 kg, incrémentés de 30 kg chaque mois pendant 5 mois puis chaque jour, de sorte que la durée d'un essai ne dépasse jamais 7 mois. On parle ainsi d'essais de fluage multi-paliers. 18 essais ont été réalisés : 6 en hiver et 12 en été.

Les poutres étant entaillées, ces essais impliquent du fluage et de la fissuration, le but premier de cette campagne expérimentale étant d'observer et analyser le couplage entre ces deux processus physiques pour des teneurs en eau initiales variables.

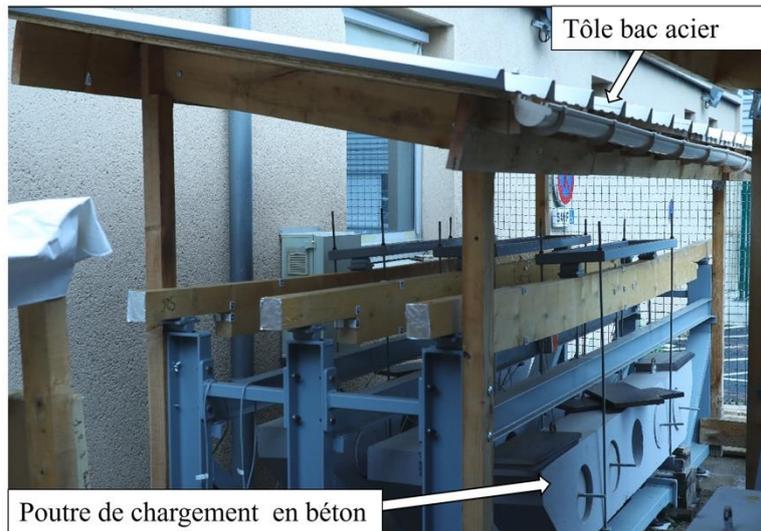


Fig. 1 : Photo de trois poutres chargées en fluage multi-paliers.

Analyse de la complaisance et estimation d'un k_{def}

Des capteurs LVDT mesurent la flèche centrale au cours de ces essais, et une méthode de suivi de marqueurs mesure les propagations de fissure et les retrait-gonflements (Bontemps et al. 2023). L'équation reliant la flèche centrale et la complaisance apparente découle de l'équation d'Euler-Bernoulli en théorie des poutres :

$$\frac{d^2u}{dx^2} = J^* \times \frac{M_z(x)}{I_z(x)} \quad (1)$$

Avec u la flèche, x la variable dimensionnelle, J^* la complaisance apparente, M_z le moment fléchissant autour de l'axe z et I_z le moment quadratique autour de l'axe z . Un schéma du chargement en flexion 4 points d'une poutre entaillée est illustré en Fig. 2. L'évolution du moment fléchissant et d'éventuelles propagations de fissures y sont représentés : C_{Ll} , C_{Hl} , C_{Lr} , C_{Hr} correspondent aux longueurs et hauteurs de fissures à gauche et à droite, respectivement.

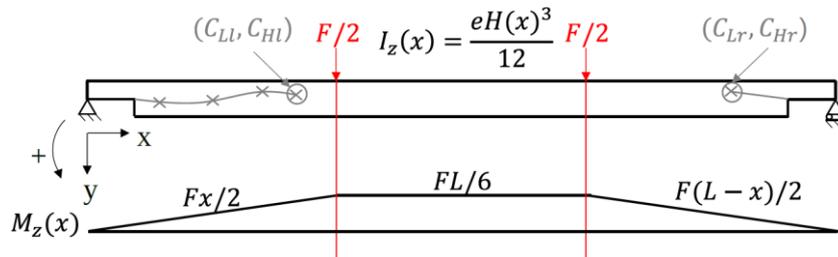


Fig. 2 : Schéma d'une poutre entaillée chargée en flexion 4-points et subissant une propagation de fissure asymétrique.

En considérant les propagations de fissure comme de simple réduction de hauteur, il est possible de les prendre en compte dans le calcul de flèche en actualisant la hauteur de la poutre dans le calcul de l'inertie I_z . Cette dernière devient dépendante de x . Dans ce travail l'équation (1) est résolue par approximation à l'aide de la méthode des différences finies. La complaisance apparente ainsi obtenue $J^*(t) = \varepsilon(t)/\sigma(t)$, avec ε et σ respectivement la déformation normale et la contrainte normale, ne correspond pas à la complaisance réelle J définie dans l'équation :

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 + \sum_{i=1}^N J(t - t_i) \Delta \sigma_i \quad (2)$$

Dans le cas d'un chargement complexe, comme c'est le cas en construction ou en chargement multi-paliers, cette complaisance J doit être modélisée. Les seules complaisances calculables par des mesures sont la complaisance apparente J^* et $J^{**} = \varepsilon(t)/\sigma_0$. Toutefois, J^* est inférieure à la complaisance réelle car le temps écoulé entre chaque incrément de charge est plus faible que le temps écoulé depuis le début de l'essai, or le fluage ralentit au moins jusqu'à la fin de la phase 2 (Granello et Palermo 2019). A l'inverse, J^{**} est supérieure à J car la contrainte réelle est supérieure à σ_0 en fluage multi-paliers. Il vient l'inégalité suivante :

$$J^*(t) < J(t) < J^{**}(t) \quad (3)$$

La loi de comportement viscoélastique d'un bois en fluage, décrivant la complaisance J , peut être représentée par des modèles rhéologiques (Bardet 2001), des lois puissances ou des relations linéaires entre complaisance et logarithme du temps (Holzer et al. 1989). Cette dernière représentation est choisie ici. Une évolution logarithmique de la complaisance est en accord avec des résultats expérimentaux à long terme (Hunt 2004) :

$$J_m(t) = J_0 \left(1 + \beta \log \left(\frac{t}{\alpha} \right) \right) \quad (4)$$

La complaisance apparente peut-être estimée par :

$$J_m^*(t) = \frac{\varepsilon_m(t)}{\sigma(t)} = \frac{J_m(t) \cdot \sigma_0 + \sum_i J_m(t - t_i) \cdot \Delta \sigma_i}{\sigma_0 + \sum_i \Delta \sigma_i} \quad (5)$$

Les paramètres α et β sont ajustés en minimisant l'erreur entre J^* expérimental et J_m^* . A partir de là, k_{def} peut être estimé par $k_{def} = \beta \left(\log \left(\frac{t}{\alpha} \right) \right)$.

Résultats et discussion

En Fig. 3a sont représentées les évolutions de J^* et J_m^* pour une poutre chargée en été. Bien qu'approximatif, le modèle de complaisance suit la même évolution que les mesures expérimentales. En Fig. 3b est représentée l'évolution du k_{def} modélisé et il est comparé à la complaisance relative expérimentale $J_{rel}^*(t) = (J^*(t) - J_0)/J_0$.

En Fig. 4 est représentée le k_{def} estimé maximal atteint en fonction de la teneur en eau initiale pour les 18 poutres chargées en fluage. En théorie, une haute teneur en eau initiale accélère le fluage. La corrélation est mauvaise ($R^2 = 0,2$) bien que visible. Dans cette situation, le k_{def} proposé par l'Eurocode 5 est fixé à 3. La figure montre que celui-ci n'a jamais cette valeur, suggérant un surdimensionnement notamment pour le bois vert.

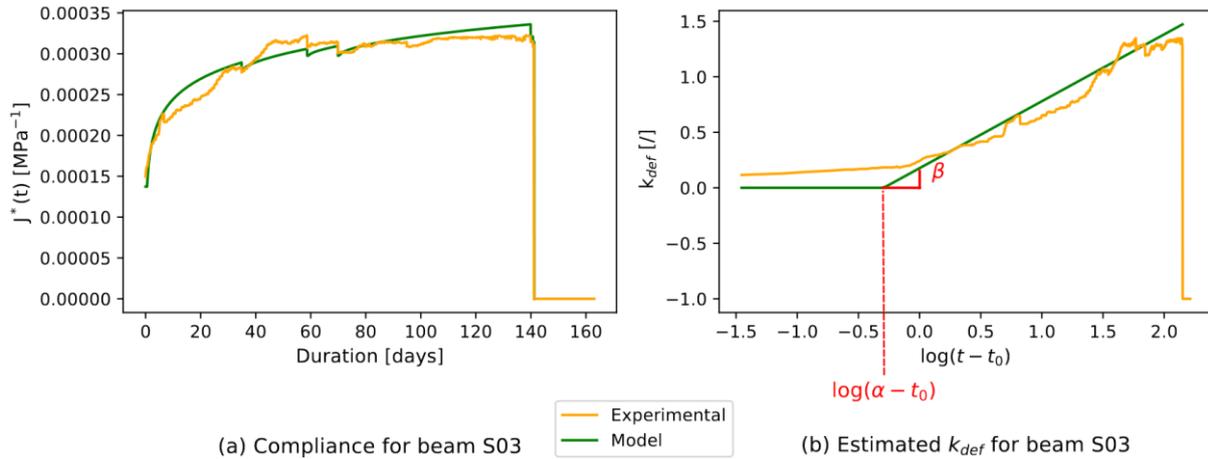


Fig. 3 : Pour une poutre, résultats de (a) la complaisance expérimentale et modélisée en fonction du temps écoulé ; (b) le k_{def} estimé et la complaisance relative expérimentale.

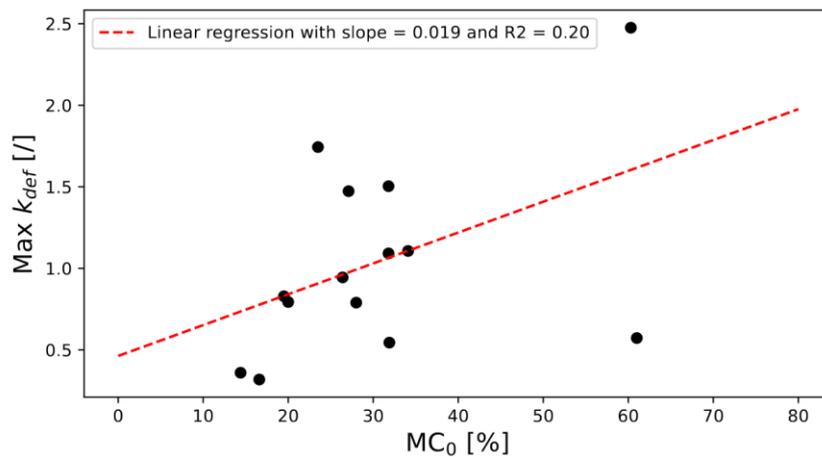


Fig. 4 : Evolution du k en fonction de la teneur en eau initiale des poutres MC_0 .

Conclusion et perspectives

Cet article propose une estimation du k_{def} pour des essais de fluage à chargement complexe et impliquant une propagation de fissure asymétrique. La méthode est appliquée à une campagne d'essais de fluage multi-paliers sur des poutres entaillées en dimensions d'emploi, en environnement extérieur et chargées à différentes teneurs en eau initiales.

La modélisation montre une bonne cohérence avec les mesures expérimentales et les k_{def} finaux obtenus sont tracés en fonction de la teneur en eau initiale de l'essai. La corrélation est mauvaise mais de nombreux autres facteurs influent sur le fluage (angle de fil, exposition au soleil ...). Il est notamment intéressant d'observer que les k_{def} obtenus sont toujours inférieurs à ceux proposés par l'Eurocode 5, encore plus pour des bois à haute teneur en eau initiale fortement pénalisés par cette norme.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Auvergne Rhône-Alpes pour la bourse CPER et les fonds du programme Hub-Innovergne de l'Université Clermont Auvergne.

Références

- AFNOR (2005), 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.
- Bardet S (2001). Comportement thermoviscoélastique transverse du bois humide : application à une essence tropicale dense, thèse de doctorat, Université de Montpellier, 232 p.
- Bontemps A (2023). Comportement mécanique des éléments de structure en bois de sapin pectiné soumis à un environnement variable., thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne, 263 p.
- Bontemps A, Godi G, Fournely E, Moutou-Pitti R, Gril J (2023). Implementation of an optical measurement method for monitoring mechanical behaviour, *Experimental Techniques*.
- Granello G, Palermo A (2019). Creep in timber: research overview and comparison between code provisions. *New Zealand Timber Design Journal*. 27(1). 6-22.
- Holzer M. S, Loferski R. J, Dillard A. D (1989), A review of creep in wood: concepts relevant to develop long-term behavior predictions for wood structures, *Wood and Fiber Science*, 21(4), 376-392 pp.
- Hunt D. G. (2004) The prediction of long-time viscoelastic creep from short-time data, *Wood Science and Technology*, 38: 479-492.
- Jockwer R, Steiger R, Frangi A (2014). State of the art review of approaches for the design of timber beams with notches, *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013068 (13 pp.).
- Morlier P et al. (2007). Creep in Timber Structures. RILEM report 8.

Approche multi-échelles d'un procédé de recyclage du MDF par voie biologique

TROILO Sarah^{1,2}, BESSERER Arnaud¹, SOUFFLET Lucas³, SAKER Safwan³,
BROSSE Nicolas¹

¹LERMAB, Université de Lorraine, INRAE, GP4W F54000 Nancy, France

²CF2P, Zi Tertre Landry, 70200 Lure, France

³CRITT Bois, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Epinal

sarah.troilo@univ-lorraine.fr

Mots clefs : déchets bois, recyclage, explosion à la vapeur, MDF, panneaux de particules, effluents

Contexte et objectifs

Au cours des dernières décennies, les habitudes de consommation des ménages ont fortement évolué. Une étude publiée par l'INSEE (Institut National de la Statistique et d'Études Économiques) montre qu'entre 1960 et 2009, les volumes de consommations ont été multipliés par trois. Dans le même temps, la durée de vie des meubles d'intérieur a diminué.

Les tendances actuelles de consommation conduisent à des volumes toujours plus importants de déchets bois qui peuvent constituer une matière première pour la production en cascade de nouveaux produits (Besserer et al. 2021). Dans ce contexte, une filière de responsabilité élargie de producteurs (REP) pour la gestion des déchets d'éléments d'ameublement (DEA) a été créée en 2012 (Ecologic 2017, Légifrance 2012). Depuis 2017, deux éco-organismes, Ecomaison et Valdelia sont chargés de la collecte et du traitement des DEA en France.

Parmi les produits manufacturés à base de bois, les panneaux de fibres de densité moyenne (MDF) sont utilisés depuis 1965 pour produire un stock de base pour l'industrie de l'ameublement (Suchsland 1987). Entre 2000 et 2020, la production mondiale de panneaux de fibres a été multipliée par quatre et depuis 2012, la production mondiale est supérieure à 100 millions m³ (FAOSTAT 2023). Pour le MDF, le volume de déchets générés au cours des cinq dernières années dans le monde est estimé à 220 millions m³ et est en constante augmentation (Irle et al 2019).

Contrairement aux autres déchets bois, il n'existe pas de processus à l'échelle industrielle pour la récupération ou le recyclage du MDF et la plupart des panneaux sont actuellement incinérés ou mis en décharge. Le MDF contient de la résine urée-formaldéhyde (UF) qui pose des problèmes de recyclage à plusieurs niveaux. La mauvaise gestion de la fin de vie des panneaux MDF a un impact environnemental négatif puisque des polluants peuvent être libérés dans l'environnement (Lee et al. 2014).

Le problème du recyclage du MDF constitue un enjeu majeur pour l'industrie de l'ameublement. L'objectif de mes travaux décrit dans ce résumé est de développer un procédé global de recyclage du MDF intégrant une élimination de la résine UF par le procédé d'explosion à la vapeur couplé à une détoxification par voie biologique des effluents liquides riches en formaldéhyde générés par le procédé.

Matériel et méthode

Traitement par explosion à la vapeur

Les essais ont été réalisés sur un panneau MDF de référence (EGGER Brilon GmbH & Co, Allemagne), découpé en cubes de 20 mm de côté pour obtenir des échantillons de taille comparable aux panneaux broyés à l'échelle industrielle et utilisés pour la fabrication de nouveaux panneaux.

Les cubes de MDF ont été traités sur un pilote d'explosion à la vapeur à l'échelle laboratoire de niveau de maturité TRL4 du LERMAB à 190 °C pendant 5, 10 et 20 minutes. En sortie du pilote, un mélange de fibres et d'effluents a été récupéré et séparé afin que chaque composé soit traité individuellement.

Spectroscopie proche infrarouge (SPIR)

Les mesures ont été réalisées sur un spectromètre Perkin Elmer (États-Unis) équipé d'un détecteur InGaAs et d'un séparateur de faisceau CaF₂. Pour chaque condition, trois échantillons de 5 g ont été analysés et pour chaque échantillon cinq spectres ont été enregistrés de 10 000 à 4 000 cm⁻¹ avec une résolution de 2 cm⁻¹.

Microscopie corrélative (CLEM)

Des analyses in situ ont été réalisées avec les équipements disponibles sur la plateforme Silvatech de l'INRAE de Champenoux. Le suivi de l'élimination de la résine sur les fibres a été effectué par microscopie corrélative. Cette technique permet l'observation de la même zone d'un échantillon en fluorescence et en microscopie électronique grâce au couplage d'un microscope confocal (CLSM) et d'un microscope électronique à balayage (MEB).

Fabrication de panneaux de particules

La recette de fabrication des panneaux de particules a été optimisée à l'échelle laboratoire afin d'obtenir un panneau de qualité P2 (NF EN 312). Les fibres dépolluées, issues du traitement par explosion à la vapeur du MDF ont été incorporées dans la fabrication des panneaux de particules. Les propriétés mécaniques des panneaux et les émissions de formaldéhyde ont ensuite été évaluées d'après les normes NF EN 319 et NF EN 120.

Bioremédiation des effluents liquides issus de l'explosion à la vapeur du MDF

Lors de l'explosion à la vapeur, les composés de la résine UF sont hydrolysés et piégés en partie dans les effluents liquides qui contiennent alors des polluants et notamment du formaldéhyde. Ils doivent donc être dépollués.

Dans un premier temps, les effluents ont été caractérisés par différentes techniques. Le formaldéhyde a été quantifié par HPLC, l'azote par la méthode Kjeldahl et les sucres par la méthode du DNS (acide 3,5-dinitrosalicylique).

Dans un deuxième temps, le potentiel d'un champignon à dégrader le formaldéhyde a été étudié. Les cultures ont été réalisées sur un milieu à base d'infusion de pommes de terre PDB (Potato Dextrose Broth), en erlenmeyer à 28 °C sous une agitation de 100 rpm (Incubator Shaker Series Innova 44, diamètre de l'orbite 2,5 cm, New Brunswick, Eppendorf, Allemagne).

Dans un troisième temps, les conditions de bioremédiation des effluents issus de l'explosion à la vapeur du MDF par ce champignon ont été adaptées en erlenmeyer puis en bioréacteur à 28°C, 80 % d'oxygène et une agitation de 200 rpm (Global Process Concept, Pro-Lab 2/3L, France).

Résultats et discussion

Hydrolyse de la résine UF et fragmentation du MDF grâce à un traitement par explosion à la vapeur

Des outils de contrôle ont été mis en place afin d'évaluer l'impact du traitement par explosion à la vapeur sur les fibres de MDF. Des analyses globales ont montré une diminution de la teneur en formaldéhyde comprise entre 93 et 97 % et une élimination de l'azote de 80 %. De plus, le MDF a été totalement fragmenté après le traitement.

L'analyse des données issues de la SPIR a présenté un fort potentiel d'une part pour distinguer le MDF des fibres traitées et dépolluées et d'autre part a permis de valider la diminution de la résine après traitement. Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les spectres de la dérivée seconde. Une étude préliminaire a montré que la zone d'intérêt se situe entre 5500 et 4570 cm^{-1} et que les bandes à 5070 et 4978 cm^{-1} peuvent être utilisées comme un marqueur de la résine UF. Une analyse SPIR a alors été réalisée sur des fibres traitées à 190 °C pendant 5, 10 ou 20 minutes afin d'étudier l'influence du temps de traitement sur l'homogénéité du traitement par explosion à la vapeur. Le tracé de la région spectrale d'intérêt (Fig. 1A) a montré une diminution de l'amplitude des bandes attribuées aux marqueurs de la résine UF dans tous les échantillons traités par explosion à la vapeur et une diminution de la variabilité intra-échantillon lorsque le temps de séjour dans le réacteur est augmenté. Le tracé des composantes 2 et 3 de l'ACP (Fig. 1B) a confirmé les tendances observées sur les spectres de la dérivée seconde (Fig. 1A).

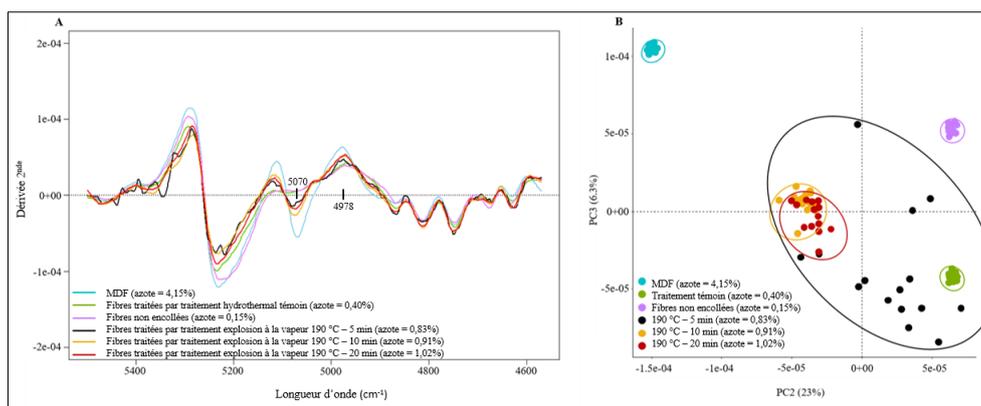


Fig. 1 : Contrôle des effets de l'explosion à la vapeur sur les fibres de MDF. A) Dérivées secondes moyennes et B) ACP des spectres IR pris sur du MDF (bleu), des fibres non encollées (violet), fibres traitées par un traitement hydrothermal (vert), fibres traitées par explosion à la vapeur à 190 °C pendant 5 min (noir), 10 min (jaune) et 20 min (rouge). Les dérivées secondes moyennes ont été calculées entre 5500 et 4570 cm^{-1} (n = 15). Les composantes 2 et 3 sont représentées sur le graphe.

La SPIR a permis de distinguer les échantillons en groupes, en fonction des conditions de traitement. Les fibres traitées par le traitement hydrothermal sont les plus proches des fibres non encollées et les fibres traitées par explosion à la vapeur se situent entre les fibres encollées (MDF) et les fibres issues du traitement hydrothermal témoin. Les fibres traitées par explosion à la vapeur à 190 °C pendant 10 et 20 minutes ne sont pas discriminées. La forte dispersion des fibres traitées par explosion à la vapeur à 190 °C pendant 5 minutes reflète la grande variabilité du traitement. Il est intéressant de noter que la variabilité de l'échantillon (ellipses de l'intervalle de confiance à 95 %) diminue avec l'augmentation du temps de séjour dans le réacteur. Plus l'ellipse est petite, plus le traitement est homogène. Ainsi, l'augmentation du temps de séjour de 5 à 10 minutes a permis d'améliorer l'homogénéité du traitement sans diminuer l'efficacité de l'hydrolyse de la résine UF.

Le traitement par explosion à la vapeur à 190 °C pendant 10 minutes a donc permis d'obtenir un bon compromis entre le temps de séjour, l'homogénéité du traitement, l'élimination de la résine et la fragmentation du matériau.

Afin de déterminer plus précisément l'effet du traitement par explosion à la vapeur sur les fibres, des observations au microscope ont été réalisées. Les fibres ont d'abord été observées au microscope confocal à fluorescence CLSM (Fig. 2.1) afin de repérer les zones d'intérêt.

Des fibres non encollées et de la résine UF colorées à la safranine ont été observées afin de réaliser des spectres d'émission de fluorescence. Les maxima d'émission étant distincts, il est possible d'appliquer une déconvolution spectrale en tout pixel de l'image afin d'attribuer un signal à la résine (vert) et au bois (rouge). Les fibres de MDF (Fig. 2.A1) apparaissent en vert et en rouge et indiquant la colocalisation de la résine et du bois. Cela valide ainsi la méthodologie. De plus, l'analyse *in situ* fait apparaître une répartition hétérogène de la résine sur les fibres. Les fibres traitées par explosion à la vapeur (Fig. 2.B1), sont caractérisées par une forte diminution de la fluorescence liée à la résine. Après observation des fibres au microscope électronique à balayage (Fig. 2.2), la microscopie corrélative (Fig. 2.3) a permis de confirmer la localisation de l'azote dans les zones vertes par microanalyse de spectroscopie de rayons X à dispersion de longueur d'onde (WDS).

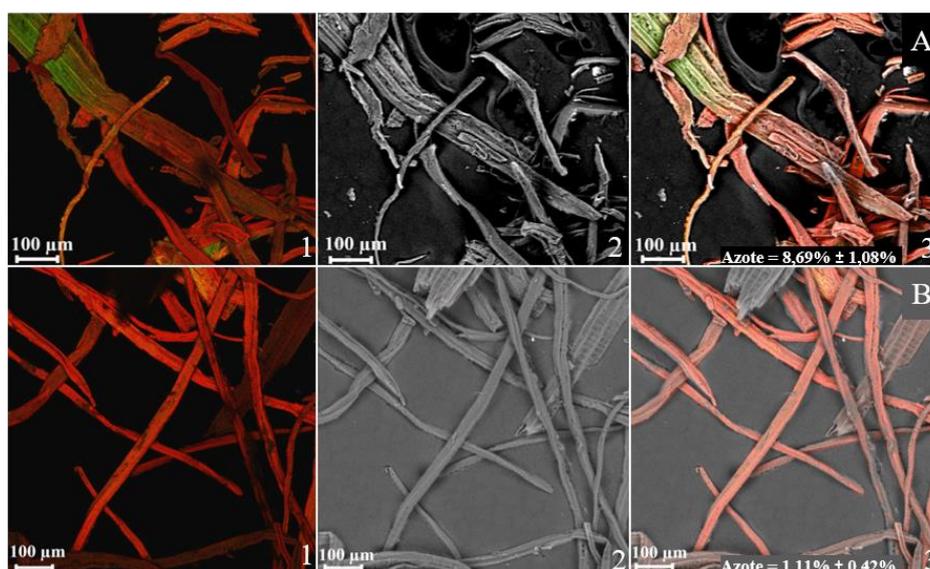


Fig. 2 : De gauche à droite : CLSM (intensité de projection maximale), MEB et CLEM de A) les fibres de MDF et B) les fibres de MDF traitées par explosion à la vapeur à 190 °C pendant 10 min, colorées à la safranine. Les pourcentages relatifs moyens d'azote de 15 acquisitions déterminées par WDS sur des pellets sont indiqués sur les images CLEM avec les intervalles de confiance à 95%.

Valorisation des fibres dépolluées dans de nouveaux panneaux

Les fibres dépolluées issues de l'explosion à la vapeur du MDF ont été incorporées dans le processus de fabrication des panneaux de particules. Les fibres issues de l'explosion à la vapeur du MDF ont été incorporées en couche intérieure, avec des copeaux de granulométrie élevée. En remplaçant 5% du bois par des fibres dépolluées, un panneau de qualité P2 a été obtenu, avec des propriétés mécaniques équivalentes à un panneau standard.

Afin d'incorporer les fibres dans les couches supérieures des panneaux de particules, des étapes de traitement supplémentaires sont indispensables. Les fibres doivent être individualisées à l'aide d'un flux d'air et tamisées dans le but de récupérer les fibres dont la longueur est proche de la granulométrie des copeaux des couches supérieures. Dans ces conditions, 5% des copeaux des couches supérieures peuvent être remplacés par des fibres dépolluées et tamisées.

Le traitement des déchets MDF par explosion à la vapeur et l'incorporation des fibres de MDF dans le procédé de fabrication des panneaux de particules a conduit au dépôt du brevet FR22-02263, Procédé et installation de traitements de déchets de panneaux de fibres de bois et panneaux fabriqués à partir de telles fibres recyclables. Il est en cours d'examen par l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI).

Bioremédiation des effluents liquides issus de l'explosion à la vapeur du MDF

0,50 mg de formaldéhyde, 19,2 mg d'azote et 1,2 mg de sucres par gramme de MDF traité ont été mesurés dans les effluents issus de l'explosion à la vapeur du MDF. 48 % de l'azote et 3 % de formaldéhyde sont récupérés sous forme liquide. Le restant de l'azote et du formaldéhyde sont libérés dans les gaz. Les effluents ont un pH compris entre 8 et 9.

Un isolat de champignon *T. atroviride* SE a été isolé sur les effluents issus de l'explosion à la vapeur du MDF. Son potentiel de bioremédiation a été étudié. L'isolat a été capable de détoxifier des milieux PDB contenant des concentrations initiales de formaldéhyde de 400, 750, 1100, 1400, 1900 et 2400 mg.L⁻¹. L'augmentation du taux de formaldéhyde a engendré un décalage de la phase de sporulation. Le champignon a sporulé lorsque tout le formaldéhyde a été décontaminé dans le milieu de culture. Cet isolat présente donc un potentiel de bioremédiation. Afin de dépolluer les effluents issus de l'explosion à la vapeur du MDF, la culture de l'isolat a été optimisée en bioréacteur (Fig. 3).

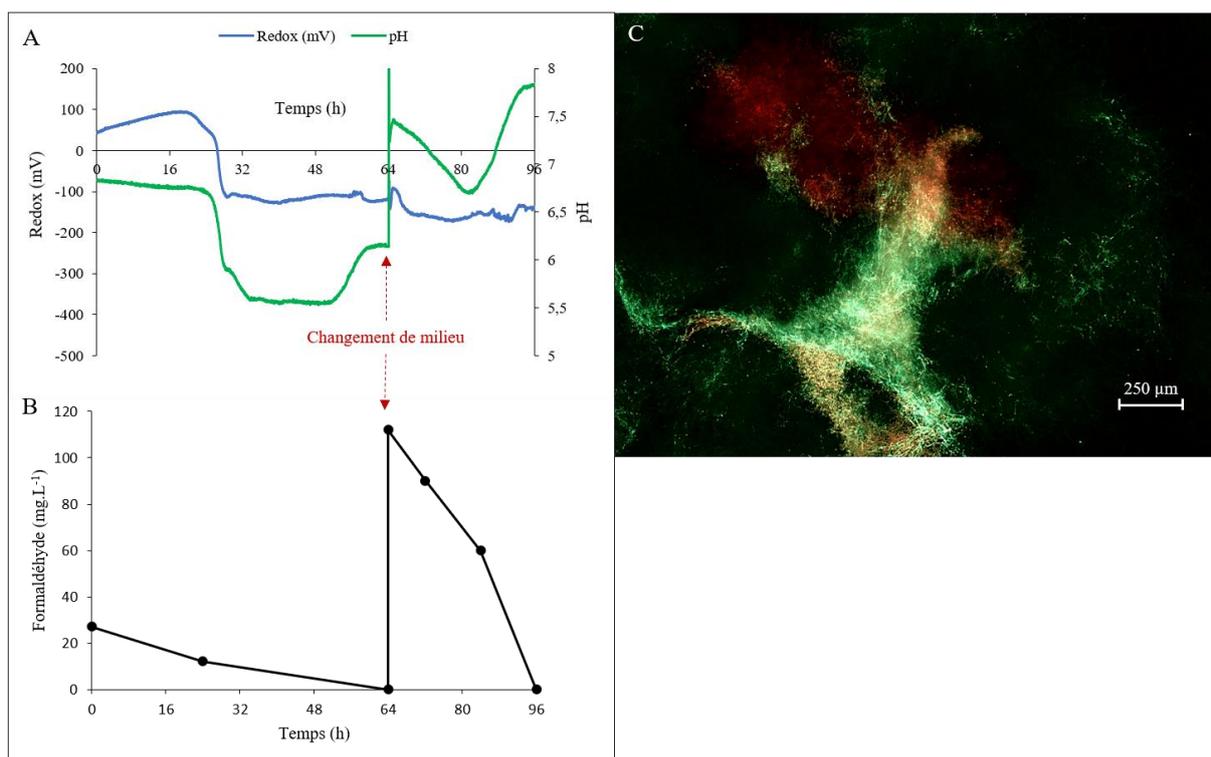


Fig. 3. Suivi de culture de *T. atroviride* SE en bioréacteur. Début de culture sur le milieu [effluents : eau] [25 : 75], PDB 2,4%, extrait de levure 2% et renouvellement du milieu à 2,6j par [effluents : eau] [90 : 10], PDB 2,4%, extrait de levure 2% A) Profils du pH et du potentiel redox, B) Détoxification du formaldéhyde et C) Viabilité de *T. atroviride* SE à 2,6 j, le champignon a été coloré avec du Syto 9 et observé sous un microscope à fluorescence.

La culture de l'isolat a été réalisée sur le milieu [effluents : eau] [25 : 75], supplémenté en PDB à 2,4% et en extrait de levure à 2%. La dilution des effluents et l'apport de nutriments ont

permis au champignon de se développer. Après 62 heures de culture, la viabilité du champignon a été confirmée au microscope à fluorescence (Fig. 3C). Le mélange de colorants utilisé colore toutes les cellules en vert et les cellules mortes en rouge. Le milieu initial a alors été remplacé par le mélange [effluents : eau] [90 : 10] avec une concentration finale de PDB à 2,4 % et d'extrait de levure à 2 %. Les effluents dilués ont été remplacés par des effluents très peu dilués. Le formaldéhyde a été totalement dégradé après un jour de renouvellement du milieu.

Une augmentation de pH a été observée lors de la dégradation de formaldéhyde pour attendre un palier à chaque fois que le formaldéhyde est complètement éliminé du milieu, comme dans les cultures préliminaires réalisées sur du PDB. Dans ces conditions, la bioremédiation des effluents est possible et rapide. Cela suggère fortement que la souche de champignon nécessite une phase d'acclimatation sur les effluents d'explosion à la vapeur dilués afin d'en diminuer la toxicité. Il semble nécessaire d'induire une voie métabolique non constitutive chez le champignon.

Conclusion et perspectives

L'objectif des travaux présentés était de développer un procédé global de recyclage du MDF. Un procédé de traitement du MDF a été optimisé afin de rendre les fibres recyclables en vue d'une future valorisation. L'explosion à la vapeur a permis de fragmenter le MDF et d'éliminer la résine UF présente sur les fibres (Troilo et al. 2023). Les fibres dépolluées ont été incorporées dans la fabrication des panneaux de particules. En ajoutant 5 % de fibres, il est possible de fabriquer un panneau de qualité P2. Finalement, les effluents issus de l'explosion à la vapeur du MDF ont été traités par voie biologique, grâce à l'action de l'isolat.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANRT, la CF2P et Ecomaison.

Références

- Besserer A, Troilo S, Girods P, Rogaume Y, Brosse N (2021) Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. *Polymers* 13, 1752.
- Ecologic (2017) Guide pratique, mise en oeuvre de la REP, DEA, DEEE.
- FAOSTAT (2023) Forestry Production and Trade.
- Irle M, Privat F, Couret L, Belloncle C, Déroubaix G, Bonnin E, Cathala B (2019) Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF. *Wood Material Science & Engineering* 14.
- Lee M, Prewitt L, Mun S.P (2014) Formaldehyde Release from Medium Density Fiberboard in Simulated Landfills for Recycling. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 42, 597–604.
- Légifrance (2012) Décret n° 2012-22 du 6 janvier 2012 relatif à la gestion des déchets d'éléments d'ameublement, 2012-22.
- Suchsland O (1987) Fiberboard Manufacturing Practices in the United States. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Troilo S, Besserer A, Rose C, Saker S, Soufflet L, Brosse N (2023) Urea-Formaldehyde Resin Removal in Medium-Density Fiberboards by Steam Explosion: Developing Nondestructive Analytical Tools. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 11, 3603–3610.

Mise au point d'un procédé d'impression 3D pour le recyclage des sciures de MDF

RAMAUX Johan^{1,2,3}, NOUVEL Cécile², ZIEGLER-DEVIN Isabelle³, BESSERER Arnaud³, NOYEL Mélanie¹

¹Acta Mobilier, 7 Rue de Madrid, 89470 MONETEAU

² Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

³ LERMAB, Université de Lorraine, GP4W, F 54 000 Nancy, France

jramaux@acta-mobilier.fr

Mots clés : Impression 3D ; Recyclage ; Panneaux de Fibres de Densité Moyenne (MDF) ; Procédé ; Tomographie Rayons X

Contexte et objectifs

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 des déchets de panneaux de fibres de densité moyenne (MDF). Ces sciures sont présentes en grandes quantités (environ 68 t par an). 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 rendre ce nouveau procédé viable et industrialisable, de nombreux verrous restent encore à lever. Parmi eux, la formulation du composite afin de mieux comprendre son comportement et son imprimabilité.

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 0.4 à 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%.

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 (Iffs, 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'influence du séchage a pu être étudié. Différents lots ont été réalisés :

- Un lot A constitué de 20% en masse de fibres de MDF et 80% de PLA pour lequel les deux intrants ont été au préalable séchés.
- Un lot C constitué de 20% en masse de fibres de MDF et 80% de PLA. Aucun des intrants n'a été séché.

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 calorimétrie permettant de comparer les flux de chaleurs échangés entre un échantillon et une référence (ici une capsule remplie d'air). Cette caractérisation permet de déterminer les caractéristiques thermiques des matériaux tel que la température de transition vitreuse (T_g) ou la température de fusion. L'analyse a été menée de 25 à 250 °C, avec une rampe de chauffe à 10 °C/min. Une première chauffe est effectuée, puis un refroidissement et enfin une deuxième chauffe. Entre chaque étape, une isotherme de 2 min est respectée. La T_g est mesurée lors de la première chauffe. Sur le thermogramme, elle est caractérisée par un changement de pente de la courbe.

Microscopie à Fluorescence

La microscopie à fluorescence, technique d'imagerie non destructive, est un type de microscopie optique utilisant le phénomène de fluorescence de particules (Davidson 1996). La lignine, de par la présence de noyaux aromatiques et de liaisons conjuguées est un composé auto-fluorescent (sans l'ajout de molécules fluorescentes). Le microscope à fluorescence Leica DM 2700 M a été utilisé avec un filtre UV pour voir l'auto-fluorescence de la lignine contenue dans le MDF. Ce filtre permet une excitation entre 320-360 nm et une émission pour toutes les longueurs d'ondes supérieures à 470 nm. Ce microscope est couplé à un objectif de microscopie à épiscopie permettant d'obtenir une image nette de la surface de l'échantillon sans avoir à réaliser de lame mince.

Tomographie RX

La tomographie RX permet de visualiser les différentes densités relatives d'un matériau. Cette technique, proche de la radiographie médicale, permet donc de visualiser l'ensemble du matériau et de ses différents composants. Afin de rendre l'analyse plus visuelle, un traitement d'image a été réalisé via le logiciel ImageJ (Schindelin et al. 2012) permettant un affichage en fausses couleurs.

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 Creality CR10 équipé d'une tête d'extrusion de pellets Mahors V4 a été utilisée (avec l'apport technique de l'ERPI¹). Cela permet d'obtenir de premiers essais préliminaires, montrant la faisabilité du procédé. La technologie d'impression 3D a été testée avec des pellets issu du lot A (intrants séchés, 20% de MDF).

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 corrélérer les propriétés initiales de la sciure et du PLA à celles du matériau composite final.

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 A et le lot C. Les résultats sont présentés dans la Fig. 1.

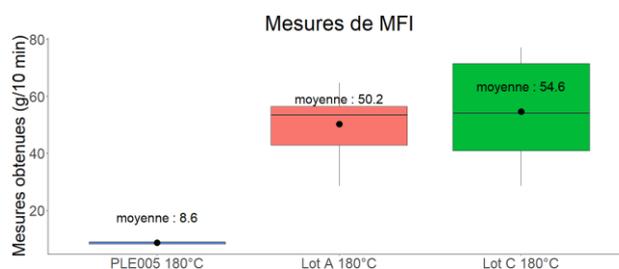


Fig. 1 : Mesures de MFI obtenues pour les différents lots

Le PLA à 180°C présente un MFI qui est en adéquation avec ce qui est couramment obtenu pour la fabrication additive (environ 10 g/10min) comme recommandé par Wang (2017). L'ajout de MDF dans le PLA entraîne alors une augmentation importante de ce dernier (facteur 6). En première approche, il apparaît que l'influence du séchage sur la fluidité à chaud du composite semble négligeable. Néanmoins, la dispersion des valeurs augmente avec l'ajout de MDF, et ce d'autant plus que les intrants ne sont pas séchés. Les recherches sont actuellement en cours pour comprendre cette augmentation de la fluidité, et de la dispersion des valeurs. Les pistes envisagées sont actuellement liées à l'hétérogénéité du mélange et à un début de dégradation du PLA, accéléré par l'eau apportée par le MDF lors de la mise en forme. Cette dispersion des valeurs se traduit par une reproductibilité médiocre des résultats et du procédé.

Calorimétrie Différentielle à Balayage

La température de transition vitreuse (T_g) est un paramètre permettant de caractériser la qualité d'un mélange. Le Tab. 1 permet de visualiser l'évolution de T_g en fonction des différents lots. Une diminution de T_g aurait été le signe d'un effet plastifiant d'un des composants, ici plus particulièrement, l'influence de la lignine contenue dans le MDF aurait pu être attendue. Or, on remarque une augmentation de T_g , traduisant le signe d'un mélange partiel entre le PLA et le MDF. Ainsi la DSC ne permet pas de conclure sur l'augmentation de la dispersion mais montre au contraire la qualité du mélange entre matrice et charge. Il convient alors d'observer la microstructure de ce mélange entre PLA et MDF et notamment la dispersion du MDF au sein de la matrice PLA.

¹ Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs

Tab. 1 : Evolution de la T_g des différents lots

| Matériaux | PLA vierge | Composite lot A | Composite lot C |
|--------------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| T° de transition vitreuse (°C) | 61 | 87 | 95 |

Microscopie à fluorescence

L'observation en microscopie à fluorescence du composite à base de bois, permet d'observer indépendamment la dispersion du PLA et du MDF. Les images ci-dessous permettent de visualiser les fibres de MDF sous fluorescence UV (Fig. 2a – les fibres apparaissent en vert). Le PLA n'est pas fluorescent mais visible en brun sur l'image en épiscopie fond noir (Fig. 2b). Par reconstruction d'image, il est possible de combiner les deux images (a et b) pour obtenir l'image c. Cela permet de mettre en évidence une répartition globalement homogène du MDF dans la matrice PLA, bien qu'imparfaite. De plus, après reconstruction, des zones sombres (cercles blancs) sont toujours apparentes. La microscopie à fluorescence montre donc une hétérogénéité du mélange, due à une miscibilité imparfaite des constituants de ce mélange. La conséquence pour l'impression de cette mauvaise miscibilité, c'est-à-dire d'une concentration en MDF localement plus importante, est la formation d'imperfections esthétiques. Afin de caractériser ces zones sombres, une imagerie en tomographie à rayons X a été réalisée.



Fig. 2 : Analyse par microscopie d'un pellet du lot C (20% de MDF, pas de séchage) : a) Fluorescence (vert=MDF) ; b) Episcopie fond noir (brun/transparent = PLA), c) Superposition

Tomographie à rayons X (RX)

La tomographie RX permet de visualiser les différentes densités relatives du matériau. Cela permet notamment de visualiser sa porosité. Le résultat de l'imagerie d'un pellet de lot C est montré en Fig. 3. Les nombreuses zones sombres correspondent à une densité nulle, c'est-à-dire du vide. Ces cavités peuvent s'expliquer par une mauvaise dispersion de la charge au sein de la matrice mais aussi par la présence d'eau à l'intérieur du composite, l'échantillon analysé n'ayant pas été séché. Effectivement cette dernière s'évapore lors du procédé générant des bulles.

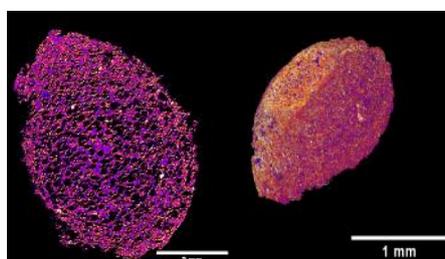


Fig. 3 : Tomographie RX d'un pellet du lot C

Impression 3D

En utilisant du PLA vierge (référence) le procédé FGF permet d'obtenir des résultats très encourageants. De premiers essais préliminaires montrent que l'impression d'un matériau composite, à base de PLA et contenant 20% en masse de fibres de MDF, est possible.

Néanmoins, certains défauts d'impressions, illustrés sur la Fig. 4 doivent être résolus. De plus, ces essais doivent pouvoir être transposés au milieu industriel, tout en permettant d'avoir des résultats reproductibles. C'est pourquoi l'étude de l'impact du séchage des intrants sur la qualité du produit finis est primordial.

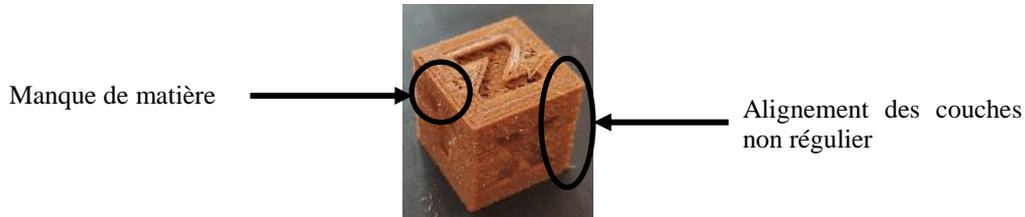


Fig.4 : Essais préliminaire d'impression 3D FGF (lot A) – cube d'arrête 20 mm

Conclusion

Le procédé d'impression 3D à partir des sciures de MDF avec du PLA, est prometteur. 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. Le séchage des intrants de matière ne semble pas être une nécessité puisque le MFI n'est pas significativement affecté. En revanche, l'absence de séchage augmente la variabilité de MFI et semble créer des cavités dans le matériau obtenu. Les essais d'impression en cours permettront de déterminer si les variabilités de MFI mesurées peuvent être la cause d'une hétérogénéité de qualité d'impression. Dans l'objectif d'obtenir une dispersion plus homogène du MDF dans le PLA, l'ajout d'un compatibilisant sera étudié. Ces derniers pourraient également conférer de nouvelles propriétés, tel qu'une meilleure résistance au vieillissement.

Références

- Davidson R.S. (1996) Application of fluorescence microscopy to a study of chemical problems. *Chemical Society Reviews*. Vol. n°25, pp. 241-253.
- FAO (2022) FAOSTAT. [en ligne]. [Consulté le 27/10/2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/FO>
- 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.
- R Core Team (2021) R: A Language and Environment for Statistical Computing [en ligne]. R. R Foundation for Statistical Computing. Disponible à l'adresse : <https://www.R-project.org>
- Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.-Y., White D. J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A. (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*. Vol. n°9, pp. 676-682.
- Wang S. (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.

Contribution à la caractérisation de bois locaux du Cameroun pour la conception de turbines pour pico-centrales hydroélectriques

FOUEDJOU NJOYA Blaise¹, KENFACK Joseph¹, ROSENKRANTZ Eric²,
AUGEREAU Franck², LAUX Didier², LANGBOUR Patrick⁴, GERARD Jean⁴,
ARNOULD Olivier³, VOUFU Joseph¹

¹Laboratoire petite hydroélectricité et systèmes hybrides, ENSPY, Yaoundé, Cameroun

²Equipe ACO, IES, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

³Equipe Bois, LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

⁴UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier, France

blaise.fouedjou@polytechnique.cm

Mots clefs : caractérisation mécanique ; bois locaux ; Cameroun ; conception ; pico-turbine ; crossflow.

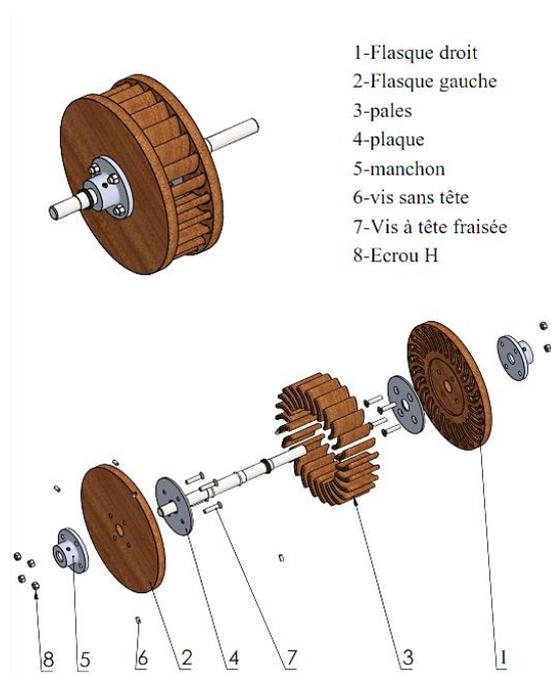
Contexte et objectifs

Les préoccupations environnementales et climatiques nourrissent l'ambition des états à produire une énergie électrique propre grâce à l'utilisation des énergies renouvelables. Dans cette dynamique, le Cameroun s'est engagé, après la COP21 de Paris, à pousser la part des énergies renouvelables à 25 % du mix énergétique à l'horizon 2035, dont 11 % pour la petite hydroélectricité. Cette projection s'appuie sur le fort potentiel Camerounais en petite hydroélectricité estimé à 970 MW (Liu et al 2019), principalement reparti en zones reculées. Le déploiement de petites centrales hydroélectriques dans ces zones contribuerait à améliorer le faible taux d'électrification rurale actuellement estimé à 25% par la banque mondiale en 2021. Toutefois, la très faible consommation dans les villages de ces régions (100 W/ménage) ne constitue pas un marché suffisant pour stimuler les grands fabricants de turbines à développer massivement de petites turbines répondant aux besoins locaux. Aussi, compte tenu du manque d'équipements adaptés pour leur mise en forme locale, elles sont importées, ce qui augmente les coûts d'installation et de maintenance. Afin de réduire ces coûts financiers et environnementaux, et de développer le potentiel hydroélectrique de ces régions reculées, on se propose de fabriquer localement des pico-turbines et autres équipements nécessaires à l'électrification de ces régions rurales à partir de solutions écologiques locales.

Ce travail de recherche s'intéresse aux caractéristiques des matériaux biosourcés et locaux susceptibles d'être utilisés dans la construction de pico-turbines. Les matériaux doivent résister à l'abrasion, à la corrosion, avoir une faible densité, une bonne rigidité et enfin être disponibles sur le marché à de faibles coûts (Ebhotu 2017, Ebhotu & Inambao 2016). Ce cahier des charges motive comme choix de matériaux les essences de bois locaux durs ayant une bonne durabilité naturelle dans l'eau, telles que le Padouk (*Pterocarpus Osun*) l'Azobé (*Lophira alata*), l'Okan (*Cylicodiscus gabunensis*), le Tali (*Erythrophleum*) et le Bilinga (*Nauclea diderrichii*) (Gérard et al. 2017). L'utilisation des essences de bois locaux est particulièrement attrayante du fait que, en tant que matériau naturel, elles sont issues de parcelles exploitées de façon raisonnée garantissant ainsi son caractère renouvelable et écologique. De plus, les bois allient naturellement légèreté et performances mécaniques comparativement aux métaux. Pour toutes ces raisons, ces bois semblent très adaptés pour le domaine de la pico-hydroélectricité limitée à la production d'une puissance de 5 kW (Gagliano et al. 2014, Kadier et al. 2017), qui est néanmoins suffisante pour électrifier une maison, un petit village ou faire tourner une industrie artisanale.

La sélection des essences de bois adaptées à la fabrication de pico-turbines présente toutefois quelques difficultés. En effet, faute de données suffisantes, il faut pour chaque type de bois caractériser la résistance à l'abrasion, les coefficients de retrait et gonflement garant d'une bonne stabilité, l'usinabilité et la majeure partie des constantes élastiques et la limite à rupture longitudinale et en compression transverse. La détermination par des mesures expérimentales de ces caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des essences de bois sélectionnés permettra d'évaluer le comportement mécanique 3D des pales de turbines et leur capacité de mise en forme, afin de définir un cadre d'application de ces bois en matière de pico-turbines.

Les résultats obtenus seront utilisés pour le dimensionnement et la fabrication de la roue d'une turbine Crossflow. Ce type de géométrie a été retenue compte tenu de sa géométrie simple par rapport à d'autres types de turbines et sa capacité à maintenir un rendement constant avec les fluctuations de débit (Dragomirescu et Schiaua 2017, Quaranta et al. 2022). La Fig. 1 montre une roue Crossflow avec ses différentes parties en vue éclatée.



Matériel et méthodes

Identification des essences sélectionnées

Pour les essais en laboratoire, 5 essences de bois sont prélevées au Cameroun, à Monatéle dans le département de la Lekie de la région du centre. Il s'agit du Padouk, de l'Okan, du Tali, du Bilinga et de l'Azobé. La Fig. 2 présente 4 madriers taillés et ponçés aux dimensions 140mm×60mm×700mm et un brut de dimension 250mm×100mm×1000mm.

Essais envisagés

Les caractéristiques recherchées seront obtenues sur « bois sec » pour la fabrication de la turbine alors que le bois sera mis en œuvre dans l'eau. Les envisagés nécessaires pour l'étude du comportement mécanique de la pico-turbine et de sa mise en forme, sont décrits par la Fig. 3.

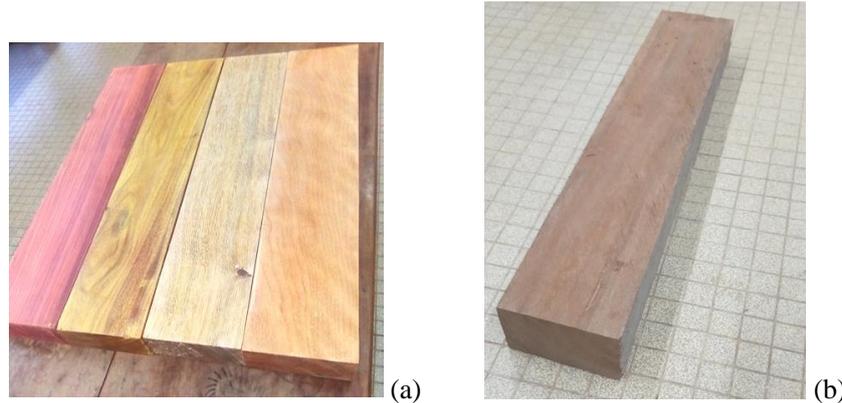


Fig. 2 : Madriers: (a) poncés de Padouk, Okan, Tali, Bilinga de dimension 140mm×60mm×700mm; (b) brut d'Azobé de dimension 250mm×100mm×1000mm

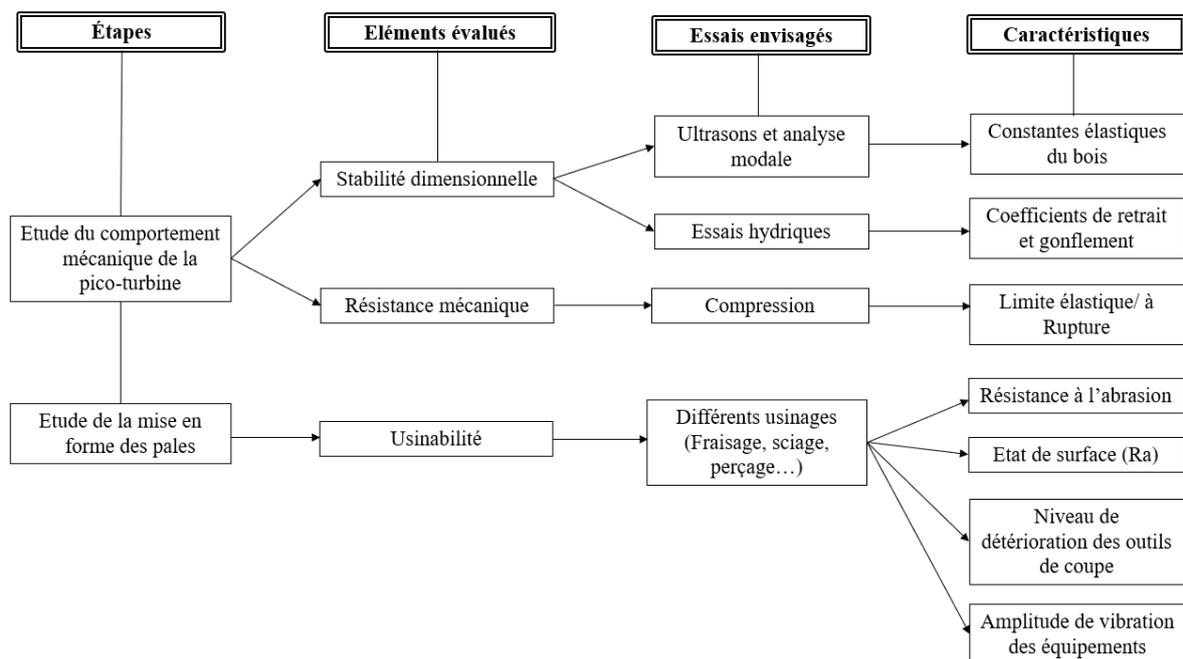


Fig. 3 : Essais envisagés et caractéristiques recherchées

Résultats attendus

- Mesures par ultrasons sur des cubes de 20 mm de côté des 6 constantes élastiques E_R , E_L , E_T , G_{RT} , G_{RL} , G_{TL} des essences de bois saturées en eau et à une teneur en eau de 12%. Comparaison des résultats entre essences et suivant le taux d'humidité. Les cubes seront ensuite réusinés sous forme de rhombicuboctaèdre afin de mesurer les coefficients de Poisson ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{RL} , ν_{LR} , ν_{LT} et ν_{TL} .
- Mesures par méthode BING des modules d'élasticité E_R , G_{RL} et G_{TL} et comparaison avec les résultats obtenus par les mesures ultrasonores.
- Mesures de la limite à la rupture dans la direction L en flexion (barreaux de Bing) et en compression, puis définition d'un critère de ruine.
- Mesures des coefficients de retrait-gonflement dans les directions R et T.
- Mesures des paramètres d'usinage et classement des essences en fonction de l'usinabilité
- Choix définitif des essences au regard de tous les résultats obtenus

Conclusion

Ces travaux de recherche ont pour but de développer l'économie locale des zones rurales du Cameroun en permettant aux populations d'améliorer leur confort de vie grâce à la promotion de l'électrification rurale à l'aide d'une production électrique écologique et renouvelable. La construction locale de pico-turbines hydroélectriques fabriquées à partir des ressources locales de bois, matériaux biosourcés et durables par excellence, revêt donc un double intérêt : un intérêt socioéconomique et un intérêt environnemental.

Remerciements

Ce projet de caractérisation est soutenu financièrement par le Labex Numev de l'Université de Montpellier.

Le projet de thèse est également soutenu dans sa phase d'implémentation par l'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD/Canada) /Projet de Déploiement des Technologies et Innovations Environnementales (PDTIE) financé par l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF), l'Organisation des États d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique, et l'Union européenne (UE) (FED/220/421-370).

Références

- Dragomirescu A., Schiaua M. (2017) Experimental and numerical investigation of a Bánki turbine operating far away from design point. *Energy Procedia*, 112(October 2016), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1057>
- Ebhota W.S. (2017) Smart Design and Development of a Small Hydropower System and Exploitation of Locally Sourced Material for Pelton Turbine Bucket Production. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 9(Paish 2002). <https://doi.org/10.1007/s40997-017-0134-9>
- Ebhota W.S., Inambao F. (2016) Design basics of a small hydro turbine plant for capacity building in sub-Saharan Africa. 1338(June). <https://doi.org/10.1080/20421338.2015.1128039>
- Gagliano A., Tina G. M., Nocera F., Patania F. (2014) Technical and Economic Perspective for Repowering of Micro Hydro Power Plants : a Case Study of an Early XX Century Power Plant. *Energy Procedia*, 62, 512–521. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.413>
- Gérard J., Guibal D., Paradis S., Cerre J.-C. (2017) Tropical Timber Atlas: Technological characteristics and uses.
- Kadier A., Sahaid M., Pudukudy M., Abu H., Mohamed A., Abdul A. (2017) Pico hydropower (PHP) development in Malaysia : Potential , present status , barriers and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, June, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.084>
- Liu D., Liu H., Wang X., Kremere E. E. (2019) World Small Hydropower Development Report 2019. United Nations Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power. Available from www.smallhydroworld.org
- Quaranta E., Pierre J., Revelli R. (2022) Optimal design process of crossflow Banki turbines : Literature review and novel expeditious equations. *Ocean Engineering*, 257(April), 111582. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111582>

Etude de la performance au collage du *Pinus patula* dans la fabrication de panneaux lamellés collés

TRIANOSKI Rosilani¹, MICHAUD Franck², MATOS, Jorge¹ IRLE Mark²,
MOREAU Jérôme², SIMON Flore², DUARTE Luigiano²

¹ Université Fédérale du Paraná

²LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois
rosilani@ufpr.br

Mots clés : Panneaux lamellés collés ; *Pinus patula* ; collage du bois ; aboutage ; acétate de polyvinyle ; adhésif isocyanate polymérisé en émulsion (EPI).

Contexte et objectifs

Actuellement, l'une des principales préoccupations mondiales est liée au changement climatique, qui est corrélé à la production d'énergie, l'industrie manufacturière et minière, la fabrication de divers produits, l'utilisation des transports, l'agriculture, la déforestation des forêts, entre autres activités (ONU, 2023). L'IBÁ (2022) indique que ce changement représente un risque majeur pour les systèmes naturels et économiques. De fait le ralentissement et l'atténuation de ses effets sont devenus des objectifs de politique publique dans le monde entier.

L'Accord de Paris, traité mondial adopté par les pays signataires de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) fixe des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En outre, il cherche à renforcer la réponse à la menace du changement climatique et à renforcer la capacité des pays à faire face aux impacts générés par ce changement (ONU 2015, MCTI 2023).

En Europe, le Green Deal européen, fruit de l'Accord de Paris, a été défini comme la nouvelle politique industrielle pour lutter contre le changement climatique, promouvoir les produits durables et circulaires, réduire les déchets et augmenter la performance énergétique (EcoReFibre - UNION EUROPÉENNE 2022).

Du côté brésilien, et sur la base de l'article 5 de l'accord, certains des engagements pris sont liés à l'encouragement de l'intégration des cultures, des forêts et du bétail, à l'élimination de la déforestation illégale et à la restauration et au reboisement de 12 millions d'hectares de forêts (naturelles et plantées). Le pacte brésilien pour l'environnement oriente davantage les efforts vers l'expansion et le développement du secteur des arbres plantés, confirmant son importance pour garantir l'approvisionnement en matières premières associées à l'économie à faible émission de carbone (IBÁ 2016).

La superficie forestière du Brésil est de 492 millions d'hectares (mi/ha), dont 482 mi/ha sont des forêts naturelles ou indigènes (98 %) et 9,93 mi/ha sont des forêts plantées (2 %). Parmi ces dernières, 7,53 mi/ha sont des Eucalyptus, 1,93 mi/ha des Pins et 0,47 mi/ha d'autres espèces. Bien qu'elles ne représentent que 2 % du total des forêts, les plantations forestières fournissent plus de 90 % du bois consommé dans les processus industriels (IBÁ 2022).

L'approvisionnement en bois des industries brésiliennes est principalement dû à la production de volumes élevés, en effet le Brésil est en tête du classement mondial de la productivité, avec une moyenne de 36 m³/ha/an pour les plantations d'Eucalyptus et 31 m³/ha/an pour les plantations de Pins, les principaux genres utilisés comme matières premières dans les industries. Cette productivité forestière prend tout son sens lorsqu'on la compare aux informations fournies

par CEI-Bois (2019), qui indique que pour produire 1 m³ de bois, 1 tonne de dioxyde de carbone (CO₂) est absorbée dans l'atmosphère et 0,7 tonne d'oxygène (O₂) est libérée. Les arbres et le bois constituent donc un important réservoir de carbone et peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation du changement climatique.

Le sud du Brésil concentre 1,72 mi/ha de forêts de Pins (89 %), dont 0,71 mi/ha dans l'État du Paraná. L'espèce traditionnellement utilisée dans les plantations est le *Pinus taeda* et, dans une moindre mesure, le *Pinus elliottii*. Les entreprises de reboisement et les industries ont toutefois cherché à planter d'autres espèces de ce genre afin de diversifier la matière première, d'améliorer la qualité des produits générés et, dans certaines régions, d'éviter les attaques sélectives de certains ravageurs, tels que la "guêpe perce-bois" (*Sirex noctilio*) et le "capucin noir" (*Sapajus nigritus*) (IBÁ 2022).

Pour ces raisons, certaines entreprises forestières situées dans la région Centre-Sud du Paraná ont investi dans des zones de *Pinus patula*. Des recherches sur la qualité du bois produit et ses applications possibles, y compris son utilisation dans les moulures et les panneaux lamellés collés (Edge glued panel - EGP), sont nécessaires pour la bonne valorisation de cette ressource.

Outre l'évaluation de l'adéquation du bois à un usage particulier, le processus de production doit répondre à des exigences de qualité minimales au meilleur coût. Dans le cadre du collage du bois pour les moulures et les panneaux lamellés collés (EGP), des paramètres tels que le type de colle et son prix, le grammage et les variables de pressage sont extrêmement importants. En effet, au-delà d'affecter la qualité et les coûts de production, ils ont un effet "en cascade" sur le volume de colle transporté (transport), la fabrication de la colle, la consommation de matières premières et la consommation d'énergie. Ceci provoque plus ou moins d'émissions de gaz à effet de serre et a une incidence sur le changement climatique.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'aptitude du bois de *Pinus patula* à la production de moulures et de panneaux lamellés collés (collage latéral), ainsi que de maximiser les variables du processus de production, la proportion de l'adhésif et la pression, afin de générer un produit dont la qualité répond aux exigences réglementaires et dont le coût et l'impact sur l'environnement soient les plus faibles possibles.

Matériel et méthode

Le bois de *Pinus patula* utilisé dans cette recherche provient d'une plantation forestière de 18 ans située à Bituruna, dans la région Centre-Sud de l'État du Paraná. Les arbres ont été collectés pour plusieurs études, totalisant un échantillon d'environ 15 m³ de grumes. Une partie des grumes (10 m³) a été divisée en planches (35 x 140 x 2600 mm) et en lattes (35 x 55 x 2600 mm) qui ont été séchées à un taux d'humidité final de 10-12% dans une industrie du bois locale et envoyées pour l'aboutage et le panneautage (collage latéral).

Le collage par aboutage a été réalisé à l'échelle industrielle, et une partie des planches a été transformée en lamelles sans défauts. Après l'obtention des lamelles sans défauts, des entures ont été usinées (longueur : 7 mm ; largeur : 3,7 mm et largeur de la pointe d'enture : 1,7 mm), puis encollés avec un adhésif à base d'acétate de polyvinyle (PVAc) appliqué par des rouleaux sur 75 % des dents. Les lamelles ont été assemblées et pressées (20 kgf.cm⁻² /± 2 MPa) dans une presse automatique, générant des pièces de dimensions 35 x 55 x 2000 mm et 35 x 140 x 2000 mm (épaisseur, largeur et longueur).

Le collage latéral (EGP) a été réalisé en laboratoire, où les planches séchées industriellement ont été conditionnées pour atteindre ou être maintenues à un taux d'humidité de 12%. Elles ont ensuite été échantillonnées afin de comprendre toute la variabilité naturelle du bois et des plans

de coupe, puis transformées en lamelles de dimensions 25 x 60 x 310 mm. Après calibrage, elles ont été mesurées pour déterminer la densité apparente.

Le plan d'expérience pour le collage latéral (EGP) comprenait l'étude de l'utilisation d'adhésifs PVAc et EPI, appliqués en grammages de 160, 180, 200 et 220 g.m⁻², et pressés entre 7 et 10 kgf.cm⁻² (un peu moins de 1 MPa), générant le plan factoriel : 2 adhésifs x 4 grammages x 2 pressions.

Les adhésifs ont été appliqués à l'aide d'un rouleau en mousse sur une seule ligne de colle et chaque grammage a été vérifié sur une balance de précision. Après l'application de la colle, les joints ont été pressés dans une presse manuelle et la pression a été calibrée et contrôlée à l'aide d'une cellule de charge numérique et d'une clé dynamométrique. Le temps de pressage a été d'une heure pour les deux adhésifs, conformément aux recommandations des fabricants, et les conditions ambiantes de l'environnement de pressage ont été de 18 à 20° C et l'humidité relative de 70/75%.

Au titre de référence et de comparaison, 2 traitements ont été produits avec du bois de *Pinus taeda*, une essence utilisée par l'industrie des moulures et des panneaux lamellés collés (EGP). Les conditions de collage ont suivi la norme industrielle adoptée pour cette essence. Au total, 18 traitements ont été réalisés, 16 conditions expérimentales avec *Pinus patula* et 2 avec *Pinus taeda*. Pour chaque traitement, 7 joints ou répétitions ont été collés.

Une fois l'adhésif complètement durci et conditionné, les joints de collage latéraux et les échantillons aboutés ont été sectionnés pour fabriquer les spécimens. La qualité de l'aboutage a été évaluée conformément à la norme ASTM 5572 (2005) à l'aide d'essais de flexion et de traction, et les échantillons ont été prétraités : adhésif sec ou durci, prétraitement à haute température, et en triple cycle avec 30 répétitions par prétraitement. L'adhérence latérale a été évaluée à l'aide du test de résistance au cisaillement selon la méthodologie recommandée par la norme EN 13354 (2009) avec un prétraitement indiqué pour les panneaux de type SWP/1 (Solid Wood Panel 1), qui sont utilisés dans des conditions sèches, et consiste à tester les spécimens après immersion pendant 24 heures dans l'eau à une température de 20±3°C. Trente-cinq échantillons ont été testés par condition expérimentale ou de collage. Après les essais, les échantillons de résistance à la traction et au cisaillement ont également été analysés pour détecter une éventuelle rupture du bois.

Une analyse statistique a été réalisée en utilisant les tests d'homogénéité de la variance, l'analyse de la variance et la comparaison de Tukey des moyennes au sein de chaque adhésif testé. Tous les tests ont été effectués à un niveau de fiabilité de 95 % (Statgraphics WVII). Les résultats des performances du *Pinus patula* ont été comparés aux exigences normatives de l'ASTM 5572 (2005) et de l'EN 13353 (2022), ainsi qu'aux performances du *Pinus taeda*.

Résultats et discussion

Densité du bois

La masse volumique apparente du bois de *Pinus patula* était de 0,432 g.cm⁻³ (CV : 15,34%) et celle de *Pinus taeda* de 0,444 g.cm⁻³ (CV : 10,69%). Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre ces deux moyennes. Comme le *Pinus taeda*, il est considéré de densité légère ou faible. Selon Sellers (1994), les bois de faible densité sont plus faciles à coller car ils ne nécessitent pas d'adhésifs à haute résistance ou performance, facilitent la mobilité de l'adhésif dans sa structure et ne requièrent pas de procédures spéciales pendant le processus de collage.

Collage de l'aboutage

Les résultats moyens du collage de l'aboutage (Tab. 1) ont montré que le bois de *Pinus patula* répondait aux exigences minimales de la norme ASTM 5572 (2005) pour la flexion statique dans tous les prétraitements, à savoir une résistance minimale de 13,8 MPa dans l'essai à sec et de 6,9 MPa dans l'essai à haute température et à triple cycle. De même, la résistance minimale a également été atteinte lors de l'essai de traction, qui recommande une valeur de 13,8 MPa lors de l'essai à sec et de 6,9 MPa lors de l'essai à haute température et à triple cycle. Les défaillances obtenues pour l'essai de traction étaient comprises entre 75 et 95 %, ce qui est considéré comme élevé et supérieur à la valeur minimale de 60 % pour l'essai à sec et de 30 % pour l'essai à cycle triple. Sur la base de ces résultats, on peut affirmer que le bois de *Pinus patula* a le potentiel ou la capacité d'être utilisé pour les moulures ou l'aboutage des panneaux lamellés collés.

Tab. 1 : Résultats moyens des collages par aboutage

| Conditions de l'essai | Résistance en flexion (MPa) | Traction | |
|-----------------------|-----------------------------|------------------|---|
| | | Résistance (MPa) | Taux de défaillance (rupture du bois) (%) |
| Réticulé/Sec | 39,46 (23,78) | 22,09 (32,74) | 95 |
| Température élevée | 28,04 (25,05) | 21,19 (29,86) | 75 |
| Cycle triple | 37,07 (23,30) | 22,71 (28,59) | 93 |

Entre parenthèses les coefficients de variation CV (%) ; n : 30 échantillons par essai (Flexion et Traction) et par condition de l'essai, totale : 180.

Collage latéral

L'analyse de la variance pour la résistance au cisaillement latéral a montré des différences statistiquement significatives entre les différents traitements ou conditions expérimentales pour chaque adhésif évalué. De faibles valeurs de résistance ont été observées dans les traitements collés avec l'adhésif PVAc, ainsi que des valeurs de rupture du bois faibles ou nulles. Bien qu'il y ait une légère tendance à l'augmentation de la résistance avec l'augmentation du poids et de la pression de l'adhésif, tous les traitements collés avec cet adhésif ont échoué en termes de qualité de collage, compte tenu de l'exigence minimale de 2,50 MPa pour le 5^e percentile requise par la norme EN 13353 (2022). Par rapport au traitement de contrôle de *Pinus taeda*, on peut toutefois dire que le comportement de la qualité de collage entre les deux espèces est similaire (Tab. 2). Dans les traitements collés avec l'adhésif EPI, des valeurs moyennes de résistance au cisaillement plus élevées ont été observées par rapport aux valeurs obtenues pour les traitements collés avec le PVAc, indiquant une meilleure performance dans le collage des panneaux lamellés collés (EGP). Cela conduit à envisager une analyse du coût et de la performance du collage.

La comparaison des moyennes entre les traitements de *Pinus patula* collés avec l'adhésif EPI a indiqué une meilleure performance pour les grammages de 180, 200 et 220 g.m⁻² et des pressions de 10 kgf.cm⁻², ainsi que pour le traitement de grammage 200g.m⁻² et une pression de 7 kgf.cm⁻², tous statistiquement égaux entre eux. Tous les traitements ont satisfait à l'exigence minimale de 2,5 MPa pour le 5^e percentile inférieur (5% d'exclusion) requis par la norme EN 13353 (2022), ainsi qu'à des valeurs de rupture du bois supérieures à 40 %, (exigence pour une masse volumique allant jusqu'à 0,60 g.cm⁻³).

Il convient de noter que même les traitements collés avec le grammage le plus faible, c'est-à-dire 160 g. m⁻², et ce aux deux pressions étudiées, ont atteint des valeurs supérieures à 2,50 MPa pour le 5^e percentile inférieur. Il est donc possible de réduire légèrement la quantité de colle

appliquée sur la ligne de collage, diminuant ainsi des coûts de production et, par conséquent, avoir une incidence positive sur la performance environnementale globale (compte tenu de la fabrication de la colle, de la consommation d'énergie, du transport).

Tab. 2 : Résultats moyens de la résistance au cisaillement du collage latéral

| Traitement | Cisaillement (MPa) | Rupture du bois (%) | 5e Percentile (MPa) |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| PVAc* | | | |
| P _{patula} /PVA/160g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 1,24 c (24,72) | 1 | 0,86 |
| P _{patula} /PVA/180g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 1,40 bc (27,67) | 1 | 0,90 |
| P _{patula} /PVA/200g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 1,32 bc (27,14) | 2 | 0,96 |
| P _{patula} /PVA/220g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 1,47 bc (22,94) | 0 | 0,93 |
| P _{patula} /PVA/160g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 1,56 b (24,23) | 0 | 1,01 |
| P _{patula} /PVA/180g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 2,21 a (21,96) | 0 | 1,37 |
| P _{patula} /PVA/200g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 2,28 a (22,19) | 1 | 1,63 |
| P _{patula} /PVA/220g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 2,41 a (16,74) | 0 | 1,85 |
| P_{taeda} /PVA/180g.m⁻²/7kgf.cm⁻² | 1,96 (34,21) | 0 | 0,98 |
| EPI** | | | |
| P _{patula} /EPI/160g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 4,22 c (15,47) | 47 | 3,38 |
| P _{patula} /EPI/180g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 4,46 bc (16,17) | 55 | 3,70 |
| P _{patula} /EPI /200g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 4,74 abc (20,37) | 42 | 3,75 |
| P _{patula} /EPI/220g.m ⁻² /7kgf.cm ⁻² | 4,48 bc (21,46) | 42 | 3,56 |
| P _{patula} /EPI/160g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 4,17 c (23,85) | 57 | 2,76 |
| P _{patula} /EPI/180g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 4,97 ab (13,74) | 44 | 4,20 |
| P _{patula} /EPI/200g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 5,10 ab (17,61) | 52 | 3,98 |
| P _{patula} /EPI/220g.m ⁻² /10kgf.cm ⁻² | 5,19 a (19,03) | 45 | 3,97 |
| P_{taeda} /EPI/180g.m⁻²/7kgf.cm⁻² | 4,03 (16,09) | 13 | 3,11 |

* e ** = p ≤ 0.05 ; Les moyennes suivies de la même lettre dans la même colonne et à l'intérieur de chaque adhésif sont statistiquement égales entre elles avec une fiabilité de 95 %. Les valeurs entre parenthèses indiquent le coefficient de variation des échantillons en pourcentage.

Conclusion

- L'adhésif EPI a montré une meilleure qualité de collage sur *Pinus patula* (et *Pinus taeda*) comparé à l'adhésif à base d'acétate de polyvinyle (PVAc).
- La qualité de l'adhésion ou du collage a eu tendance à augmenter avec le grammage et la pression.
- *Pinus patula* présente des résultats sur l'aboutage qui sont supérieurs aux exigences de l'ASTM 552 (2005) à la fois pour la flexion et la traction.
- *Pinus patula* a montré des résultats de qualité de collage latéral (EGP) supérieurs aux exigences de la norme EN 13353 (2008), lorsqu'il est collé avec un adhésif EPI.
- *Pinus patula* a montré une qualité de collage similaire ou supérieure à *Pinus taeda*, la principale espèce utilisée par l'industrie du moulage et du panneau (EGP).
- *Pinus patula* convient ou a un potentiel pour la production de moulures et de panneaux lamellés collés (EGP).

Remerciements

Aux entreprises Remasa Reflorestadora, Randa Compensados Portas e Molduras, à l'Université fédérale du Paraná (UFPR), à l'École supérieure du bois (ESB), et en particulier au programme Capes Brafitec.

Références

American Testing Society for Testing and Materials (2005) ASTM 5572, Standard specification for adhesives used for finger joints in nonstructural lumber products.

CEI-Bois (2019) Wood- Building the Bioeconomy, 56 p.

European Standard (2022) EN 13353, Solid wood panels, Requirements.

European Standard (2009) EN 13354 Solid wood panels, Bonding quality, Test Method.

European Union, Ecorefibre (2022) European wood panel industry scales up end-of-life recycling and circular uses of recovered wood. Press release.

IBÁ (2022) Relatório Anual 2022.

IBÁ (2016) A importancia e o potencial de uso da madeira plantada. <https://iba.org/750-a-importancia-e-o-potencial-de-uso-da-madeira-plantada>.

MCTI (2023) Acordo de Paris. https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf

ONU (2023) Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

ONU (2015) Convention-cadre sur les changements climatiques, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1

Sellers T (1994) Adhesive in the Wood Industry, Handbook of adhesive technology, Cap. 37.

Méthode de calcul du PSF (Point de Saturation des Fibres) à partir de la variation de surface du plan radial-tangentiel

GUIBAL Daniel¹, GERARD Jean¹, GUYOT Alban¹

¹UR BioWooEB, CIRAD
daniel.guibal@cirad.fr

Mots clefs : bois, Point de Saturation des Fibres (PSF), essais, méthode

Contexte et objectifs

La notion de PSF a été introduite par Tiemann (FPL Madison - USA) en 1906 en étudiant la résistance à la compression axiale et sa variation avec l'humidité du bois (PSF mécanique). Wilson (FPL Madison - USA) en 1932 réalise de nombreuses mesures mécaniques et physiques (retraits de séchage) et constate que le PSF tangentiel est différent du PSF radial mais aussi du PSF mécanique.

Le PSF est un bon indicateur de l'évolution de propriétés physiques et mécaniques lors des variations d'humidité. Le terme « zone » de saturation serait plus approprié que « point » de saturation. De plus, chaque estimation du PSF donne un résultat qui dépend du type (mécanique ou retrait) et de la direction (radiale, tangentielle) de mesure.

Depuis le début des années 30, le « Centre d'étude des Bois », dépendant du Ministère des colonies et ancêtre du CTFT, déterminait le PSF (dénommé à l'époque « Point de saturation à l'air ») à partir de la variation de volume de petites éprouvettes de bois de 20 x 20 x 20 mm. La méthode nécessitait des mesures de volume des éprouvettes entre l'état saturé et l'état anhydre. Ces mesures de volume se faisaient par immersion dans le mercure, à l'aide d'un « voluménomètre à mercure ».

Dans les années 90, pour des raisons sanitaires, on commence à éviter autant que possible d'utiliser du mercure dans les laboratoires. De plus, lors de l'essai, du mercure pouvait être piégé dans les éprouvettes et le calcul du PSF donnait des résultats parfois surprenants. C'est à cette époque, au sein du laboratoire de physique des bois du Cirad-Forêt (successeur du CTFT), qu'Anne Thibaut met au point et valide une méthode de calcul du PSF basée sur la variation de surface du plan radial-tangentiel de petites éprouvettes.

L'objectif de ce poster est de présenter pratiquement cette méthode mise en œuvre par le laboratoire de physique des bois de l'UR BioWooEb du Cirad depuis près de 30 ans.

Matériel et méthodes

La méthode « historique »

La méthode employée dans le laboratoire de physique des bois depuis les années 1930 jusqu'aux années 1990 consistait à mesurer la variation de volume de dix éprouvettes de 20 x 20 x 20 mm réparties sur un billon ou sur un plateau.

Chaque éprouvette (d'humidité h connue par mesure de l'humidité d'une éprouvette jumelle) était saturée puis son volume était mesuré à l'aide d'un voluménomètre à mercure (V_s). Elle était ensuite mise à sécher à l'air ambiant jusqu'à atteindre son humidité initiale, puis son volume V_h était mesuré à nouveau. Elle était enfin mise à l'étuve jusqu'à l'état anhydre et son volume (V_a) était mesuré une dernière fois

- Calcul du gonflement volumétrique total : **GB** $GB = \frac{V_s - V_a}{V_a} \times 100$
- Calcul du coefficient de gonflement volumétrique : **Gv** $Gv = \frac{Vh - V_a}{V_a \times h} \times 100$
- Calcul du Point de Saturation des Fibres : **S** $S = \frac{GB}{Gv}$

La méthode actuelle

La limitation de l'utilisation du mercure dans les laboratoires a entraîné l'abandon du voluménomètre à mercure et donc de la méthode « historique ». La méthode développée par Anne Thibaut pour la détermination du PSF s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle les variations de dimensions du bois sont nulles au-dessus du PSF et linéaires entre le PSF et l'état anhydre. Cette méthode repose sur la mesure des dimensions radiales et tangentielles d'éprouvettes orientées, successivement dans des états : saturé puis stabilisé et enfin anhydre. Un état stabilisé correspond à celui d'une éprouvette en équilibre dans une ambiance donnée (température et humidité constante), c'est-à-dire dont la masse est devenue constante ; l'éprouvette est alors considérée « stabilisée ».

Trois ambiances de stabilisation sont définies :

- 30°C – 85 % HR, qui correspond à une humidité théorique du bois d'environ 18%
- 20°C – 65 % HR, qui correspond à une humidité théorique du bois d'environ 12%
- 20°C – 30 % HR, qui correspond à une humidité théorique du bois d'environ 6%

A chacune des 5 étapes, la masse, la dimension radiale et la dimension tangentielle de l'éprouvette sont déterminées.

Pour les 5 états (saturé, « 18% », « 12% », « 6% » et anhydre), on détermine :

- la « surface » de l'éprouvette qui est le produit de la dimension radiale par la dimension tangentielle
- le taux d'humidité réel de l'éprouvette (sa masse à l'état anhydre constituant la référence)

La représentation sur un graphe de la différence entre la « surface » saturée et la « surface » à l'un des 4 autres états (en abscisse) en fonction de l'humidité réelle de l'éprouvette dans l'état correspondant (en ordonnée) permet d'obtenir le PSF par régression linéaire sur ces 4 points. Le PSF correspond à l'intersection de la droite de régression et de l'axe des ordonnées (Fig. 1).

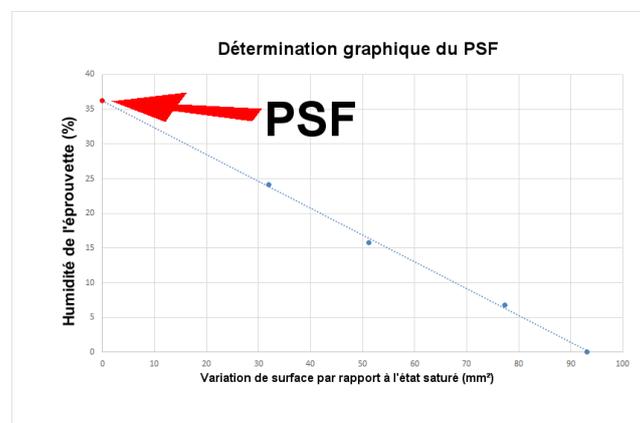


Fig. 1: Détermination graphique du PSF : humidité de l'éprouvette de bois en fonction de sa variation de surface, à partir de l'état saturé.

En pratique

La détermination du PSF se fait sur éprouvettes orientées : 20 mm (radial) x 20 mm (tangentielle) x 10 mm (longitudinal). Les éprouvettes sont référencées (stylo bille noir) et leurs arêtes sont ébavurées au papier de verre fin (240). A l'aide d'un tampon encreur constitué d'un morceau de tuyau souple, on repère et on marque le centre d'une face tangentielle-longitudinale pour la mesure de la dimension radiale, et d'une face radiale-longitudinale pour la mesure de la dimension tangentielle (Fig. 2).

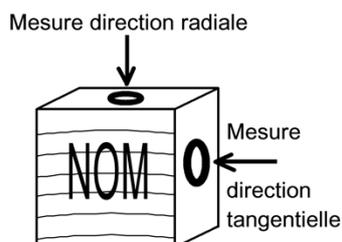


Fig 2. Préparation de l'éprouvette

Les mesures sont faites à l'aide d'un comparateur au 1/1000^e mm et les pesées sont faites sur une balance au 1/1000^e g (Fig. 3).



Fig. 3 : Mise en place de l'éprouvette et contact avec la touche plate du comparateur (Ø 5 mm)

Résultats et discussion

La distribution des PSF moyens obtenus en utilisant la méthode « historique » (plus de 3000 essais) met en évidence certaines valeurs nettement supérieures à 40%, peu conformes à ce que l'on pouvait attendre (Fig. 4).

En effet, chaque éprouvette faisait l'objet de 3 mesures à l'aide du volumétre à mercure. Outre les possibles erreurs opérateurs, l'utilisation de cet équipement pouvait être entachée de biais. Biais liés au piégeage de billes de mercure dans le bois ou à la mesure du taux d'humidité sur éprouvette jumelle qui pouvaient fausser les mesures.

La distribution précédente est comparée à celle correspondant à des valeurs de PSF déterminées à l'aide de la méthode actuelle sur 500 éprouvettes prélevées dans 21 essences de bois de Polynésie. Malgré l'absence d'effet de lissage lié au calcul d'un PSF moyen (Fig. 5), il apparaît sur cette nouvelle distribution que très peu de valeurs sortent des limites 20% - 40%.

La méthode utilisée depuis les années 90 dans le laboratoire de physique du Cirad est simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'équipements coûteux ni de produits dangereux.

A partir d'une même série de mesures de dimensions et de pesées, elle permet d'obtenir simultanément le PSF et les retraits linéaires totaux suivant les directions radiale et tangentielle

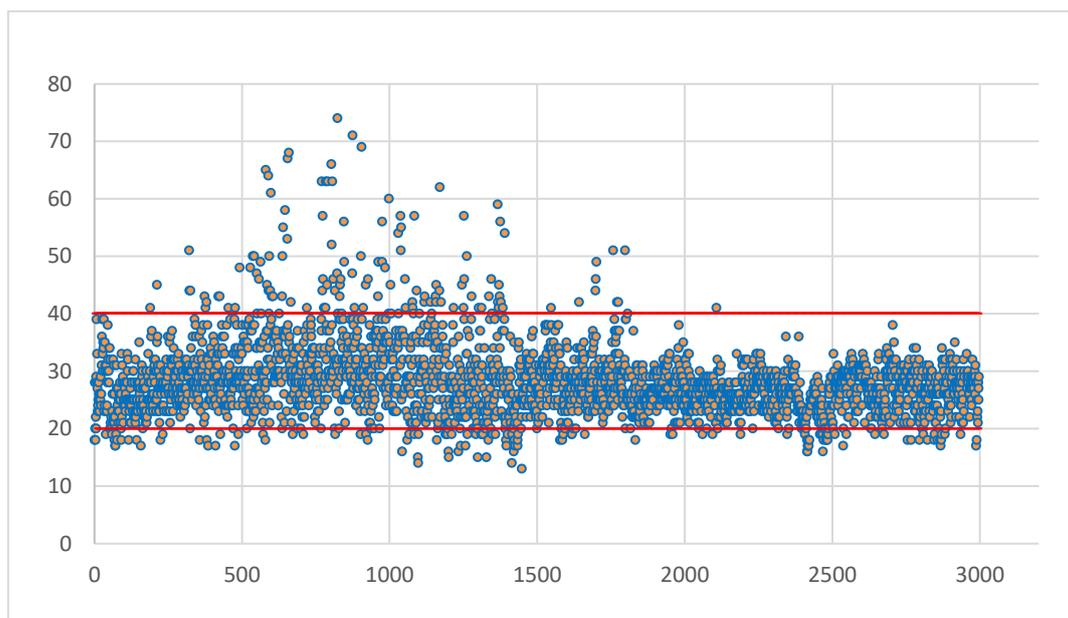


Fig 4 : Valeur du PSF moyen pour 3000 essais réalisés durant 60 ans avec la méthode « historique »

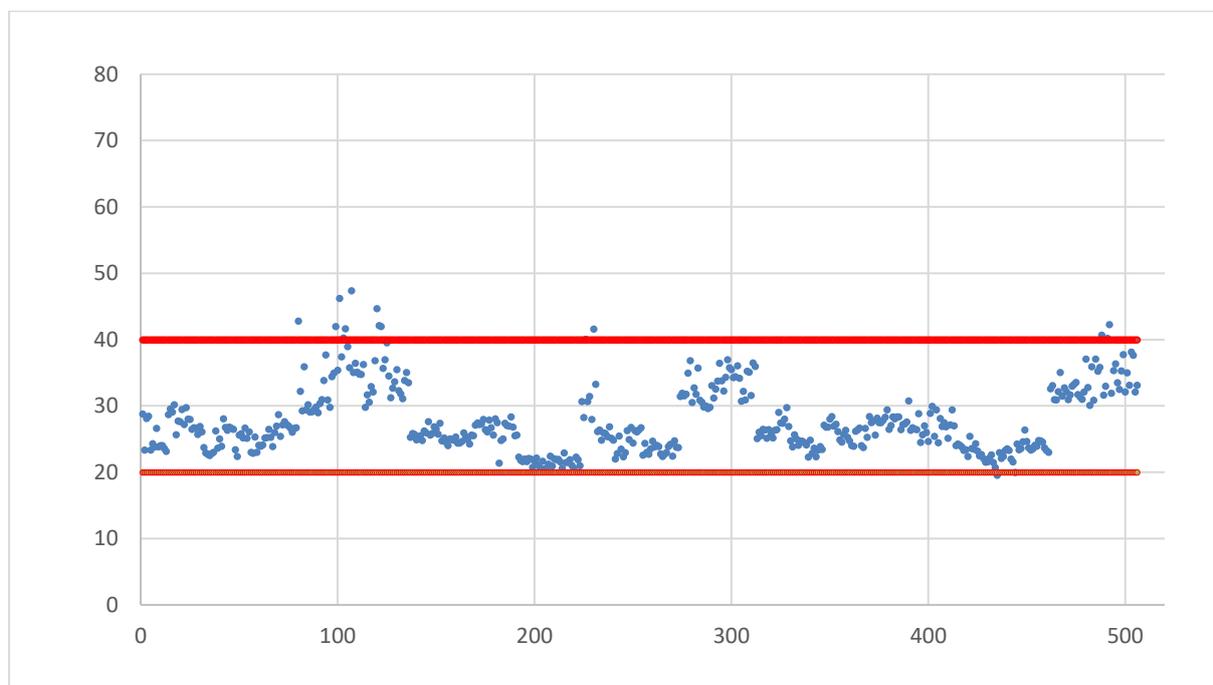


Fig 5 : PSF déterminé sur 500 éprouvettes prélevées dans 21 essences de bois de Polynésie selon la méthode actuelle

De plus, la mesure du volume saturé de l'éprouvette (par poussée d'Archimède) lors de la première étape de l'essai (mesures à l'état saturée) permet d'obtenir simultanément l'infradensité.

Compte tenu des phases successives de stabilisation des éprouvettes, la durée totale d'un essai est comprise entre un mois et demi et deux mois. La durée de réalisation effective de l'essai (mesures des dimensions et pesées) est comprise entre 5 et 6 jours.

La Fig. 6 montre des exemples de résultats obtenus.

Remerciements

Bernard THIBAUT

Références

Tiemann HD (1906) Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. U.S. Department of Agriculture, Washington
(<https://archive.org/details/effectmoistureu00tiemgoog/mode/2up>)

Wilson TRC (1932) Strength-moisture relations for wood. Tech.Bull.282.Washington, DC: U.S. Department of agriculture.

Collectif (2016) Atlas des bois tropicaux Caractéristiques technologiques et utilisations. Éditions Quæ. ISBN : 978-2-7592-2551-4.

Collectif (2015) Mémento du forestier tropical. Éditions Quæ. ISBN : 978-2-7592-2341-1.

Caractérisation mécanique de panneaux CLT par méthode non destructive

BRANCHERIAU Loïc¹, FAIRCLOTH Adam^{2,3}, KARAMPOUR Hassan³,
KUMAR Chandan^{2,4}

¹CIRAD, UPR BioWooEB, Univ. Montpellier, Montpellier, France

²Department of Agriculture and Fisheries, QLD Government, Brisbane, QLD, Australia

³School of Engineering and Built Environment, Griffith University, QLD, Australia

⁴School of Engineering, University of Southern Queensland, Springfield, QLD, Australia

loic.brancheriau@cirad.fr

Mots clefs : panneaux CLT ; évaluation non destructive ; propriétés élastiques ; vibrations acoustiques

Contexte et objectifs

Les produits en bois d'ingénierie sont de plus en plus répandus dans l'industrie de la construction en raison de leurs excellentes performances sismiques, de leurs avantages en matière de préfabrication, de leur installation plus rapide sur site, de leur rôle de puits de carbone naturel, de la réduction des coûts de construction et de l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et de ses performances thermiques (Wang et al. 2018, McGavin et al. 2020). La conception des panneaux CLT nécessite la prise en compte de facteurs spécifiques dus à la nature du matériau bois (Brandner 2013, Kremer et Symmons 2018). Ross (2015) a présenté une revue des techniques d'évaluation non-destructive (END) utilisées dans le monde, dont la majorité concerne l'évaluation des poutres, des grumes et des arbres sur pied. Parmi ces techniques, les systèmes actuels d'END acoustique utilisent l'analyse vibroacoustique des signaux produits par impulsion (Brancheriau et Bailleres 2002). Il a été prouvé que l'END acoustique permettait d'obtenir des caractérisations rapides et précises des propriétés élastiques pour toute une gamme de produits en bois. Plusieurs études (Brancheriau et Bailleres 2002, Bucar et Bucar 2011, Shirmohammadi et al. 2020) ont utilisé cette méthode pour déterminer les propriétés élastiques du matériau testé. Cependant, aucun système de ce type n'a été adopté par l'industrie pour le CLT, probablement en raison de la complexité de la mise en œuvre et de l'inversion de l'équation du mouvement pour des plaques épaisses orthotropes. Faircloth et al (2021) ont étudié quatre conditions aux limites pour un système d'essai non destructif en ligne adapté aux CLT. Parmi les conditions limites évaluées, la condition de libre appui sur tous les côtés était la plus appropriée pour des mesures rapides ; elle a de plus été considérée comme plus facilement transposable dans l'industrie. Une méthode d'END performante pour les fabricants de CLT permettrait de connaître les propriétés de chaque panneau classé individuellement. L'objectif de cette étude était d'étudier la faisabilité du développement d'un système d'END acoustique pour les panneaux CLT minces et épais par le biais d'un essai sur panneaux de taille industrielle, en vue d'une application en ligne d'un outil de caractérisation et de classement.

Matériel et méthode

Un ensemble de 28 panneaux CLT de dimensions latérales ($x = 3.0$ m ; $y = 2.4$ m majoritairement) avec 5 épaisseurs différentes ($z = 7,5$ cm ; $10,5$ cm ; $11,5$ cm ; $12,5$ cm ; $15,0$ cm) a été testé. Toutes les expériences ont été menées sur des panneaux fabriqués en Australie à partir de *Pinus radiata*. Ces panneaux sont considérés comme minces à modérément épais. Les panneaux sont dans un premier temps mis en vibrations libres par un choc à une extrémité. Les vibrations sont captées par un accéléromètre positionné à l'autre coin. La fréquence

d'échantillonnage était de 8 kHz avec une résolution de 0,156 Hz. Des essais statiques ont été réalisés dans un deuxième temps selon les normes EN-16351 et EN-408. Les modules d'élasticité E_x , E_y ont ainsi pu être déterminé, de même que le cisaillement roulant G_{xy} et les deux cisaillements transverses G_{xz} et G_{yz} .

La méthode des éléments finis a été utilisée pour modéliser le comportement dynamique d'une plaque orthotrope épaisse selon la théorie de Hencky-Mindlin. L'équilibre d'un élément de plaque sans forces extérieures peut être écrit comme suit (Brancheriau 2022) :

$$\frac{h^3}{12} \left(C_{11} \frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x^3} + (2G_{12} + C_{12}) \left(\frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial x^2 \partial y} \right) + C_{22} \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial y^3} \right) - \rho \frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial^3 \theta_x}{\partial x \partial t^2} + \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial y \partial t^2} \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1) \quad (1)$$

Avec x , y , z les coordonnées spatiales (associées aux indices 1, 2, 3 respectivement), t est le temps, h est l'épaisseur du panneau, ρ est la densité du panneau, θ_x et θ_y sont les angles de rotation de la section transversale (associés aux moments de flexion), w est le déplacement, les C_{ij} sont les coefficients de la matrice de rigidité, et les G_{ij} sont les modules de cisaillement (avec $G_{12} = C_{33}$). Le développement théorique complet est en accès libre dans le Dataverse du Cirad (Brancheriau 2022). Un code spécifique a été développé avec GNU Octave (le problème direct est en accès libre). Le type d'élément est rectangulaire (bien adapté à ce cas particulier et orienté le long des axes x et y) avec un polynôme du quatrième ordre pour approximer les déplacements nodaux. Connaissant les valeurs des dimensions, de la densité et des propriétés mécaniques, le modèle numérique permet de déterminer les fréquences de vibration du panneau. Trouver la solution du problème inverse revient à déterminer les 5 propriétés mécaniques à partir des fréquences expérimentales. Le critère suivant a été calculé afin de minimiser la différence entre les fréquences expérimentales et les fréquences calculées :

$$\delta = \sum_{k=1}^{N_f} \frac{|f_{exp k} - f_{comp k}|}{f_{exp k}} \quad (2)$$

Avec δ le critère, $f_{exp k}$ la fréquence expérimentale de rang k , et $f_{comp k}$ la fréquence calculée de rang k . Ce critère permet de prendre en compte les différences d'échelle entre les fréquences. Ce critère a été minimisé par une méthode d'optimisation adaptée de celle proposée par Nelder-Mead.

Résultats et discussion

Les résultats complets de cette étude sont en cours de publication. Le Tab. 1 présente les erreurs de calcul des propriétés mécaniques pour 5, 8 et 12 fréquences de résonance sélectionnées et des résolutions de 0,5 ; 1,0 et 1,5 Hz. Les résultats présentent une erreur modérée (de 7% à 11%) pour 5 fréquences de résonance sélectionnées quel que soit la résolution. Les résultats pour huit fréquences présentent une faible variation (erreur de 1%). L'analyse des erreurs sur l'ensemble des 5 propriétés mécaniques (E_x , E_y , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz}) déterminées par la procédure d'optimisation a montré que les résultats pour 12 fréquences choisies présentent des erreurs les plus faibles lorsque la résolution en fréquence $< 1,0$ Hz. D'une manière générale, lorsque le nombre de fréquences sélectionnées augmente, l'erreur sur les valeurs des propriétés mécaniques diminue. La redondance des informations expérimentales améliore la convergence et la précision de la solution du problème inverse. L'effet de la résolution en fréquence semble être moins important sur la précision que le nombre de fréquences à prendre en compte. Toutefois, on observe que l'erreur sur les propriétés mécaniques augmente à mesure que la résolution de fréquence (erreur en Hz) augmente.

La Fig. 1 présente la relation entre les propriétés mécaniques prédites et mesurées de E_x . La relation linéaire est statistiquement significative avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,77$. Pour toutes les cinq propriétés mécaniques (relations non montrées ici), les constantes des

régressions linéaires ne sont pas significatives à une exception près (Fig. 1). Un biais notable est observé pour E_x ; dans ce cas, pour des valeurs faibles de E_x , le test acoustique a sous-estimé la valeur de ce paramètre et pour des valeurs élevées, le module E_x a été surestimé. La valeur du module E_x était en moyenne plus élevée que celle de E_y et G_{xy} . Les fréquences associées à E_x sont donc élevées, la fréquence la plus faible étant observée pour G_{xy} puis pour E_y . Une explication possible du biais observé pour E_x serait l'effet du recouvrement des fréquences entre les harmoniques de torsion (G_{xy}) ou de flexion (E_y). La différence moyenne entre l'essai acoustique et statique était de 5 %, 8 % et 19 % pour les propriétés mécaniques E_x , E_y et G_{xy} respectivement.

Tab. 1 : Erreur relative des propriétés mécaniques calculées (ici E_x) induite par la résolution en fréquence et par le nombre de fréquences de résonance utilisées dans la procédure d'optimisation.

| Nombre de fréquences | Résolution en fréquence (Hz) | E_x Erreur (%) |
|----------------------|------------------------------|------------------|
| 5 | 0,5 | 11 |
| 5 | 1,0 | 7 |
| 5 | 1,5 | 7 |
| 8 | 0,5 | 1 |
| 8 | 1,0 | 1 |
| 8 | 1,5 | 1 |
| 12 | 0,5 | 1 |
| 12 | 1,0 | 0 |
| 12 | 1,5 | 6 |

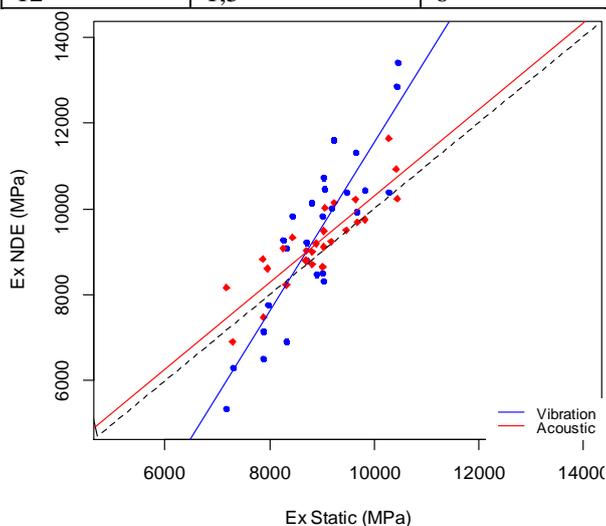


Fig. 1 : Comparaison entre essais acoustiques (en bleu) et statiques pour E_x .

En rouge, la comparaison entre des essais BING et statiques sur des découpes de panneaux (non discutée ici). $E_x \text{ NDE} = 1,97 E_x \text{ Static} - 8108$; $R^2 = 0,77$.

Conclusion

Cet article de synthèse présente le développement et l'évaluation d'un système de contrôle non destructif pour le classement en ligne des panneaux CLT. Dans le cadre de cette étude, plusieurs approches ont été présentées pour valider la méthode expérimentale et l'inversion du modèle numérique. La convergence du modèle dépendait fortement de l'identification correcte des fréquences de résonance pour les propriétés mécaniques recherchées. Le nombre des fréquences sélectionnées a également été étudié pour tester leur influence sur la précision de la convergence. L'analyse de sensibilité a montré que l'erreur de prédiction diminuait avec l'augmentation du nombre de fréquences sélectionnées. L'étape de validation par le biais

d'essais statiques a indiqué de fortes relations entre les valeurs statiques et vibratoires pour E_x , E_y et G_{xy} . La différence moyenne entre ces deux types d'essais était de 5 %, 8 % et 19 % pour les propriétés mécaniques E_x , E_y et G_{xy} respectivement. Les écarts mis en évidence ont montré qu'une identification correcte de la valeur et du rang des fréquences de résonance était nécessaire et que cette identification avait tendance à être moins efficace pour les modes supérieurs en raison de l'effet de recouvrement de ces modes. Pour les basses fréquences, c'est la résolution fréquentielle qui est un paramètre clef dans la convergence du modèle.

Remerciements

Les chercheurs remercient le Centre for Future Timber Structures (CFTS - IH150100030) et l'Australian Research Council (ARC) pour le financement de ce projet. Les auteurs souhaitent remercier la société XLam Australia Pty Ltd. pour son soutien et la fourniture du matériel qui ont permis de maintenir l'orientation et l'applicabilité de l'étude. Nous remercions le Dr. Henri Baillères pour sa contribution à l'étude et sa connaissance approfondie de l'industrie et des méthodes d'END.

Références

Brancheriau L. (2022) Acoustic vibration modelling of wooden thick orthotropic plates. CIRAD Dataverse, doi: <https://doi.org/10.18167/DVN1/2VOPIL>.

Brancheriau L., Bailleres H. (2002) Natural Vibration Analysis of Clear Wooden Beams: A theoretical Review. *Wood Science and Technology*, vol. 36, pp. 347-365, doi: 10.1007/s00226-002-0143-7.

Brandner R. (2013) Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*, vol. 1.

Bucar D.G., Bucar B. (2011) Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood Research*, vol. 56, no. 1, pp. 67-76.

Faircloth A., Brancheriau L., Karampour H., So S., Bailleres H., Kumar K. (2021) Experimental Modal Analysis of Appropriate Boundary Conditions for the Evaluation of Cross-Laminated Timber Panels for an In-line Approach. *Forest Products Journal*, vol. 71, no. 2, pp. 161-170, doi:10.13073/FPJ-D-20-00062.

Kremer P., Symmons M. (2018) Perceived Barriers to the Widespread Adoption of Mass Timber Construction: An Australian Construction Industry Case Study. *Mass Timber Construction Journal*, vol. 1, pp. 1-8.

McGavin R.L., Dakin T., Shanks J. (2020) Mass-timber Construction in Australia: Is CLT the only answer? *BioResources*, vol. 15(3), pp. 4642-4645.

Ross J.R. (2015) *Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition*. General technical report FPL-GTR-238, vol. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 169p.

Shirmohammadi M., Faircloth A., Redman A. (2020) Determining acoustic and mechanical properties of Australian native hardwood species for guitar fretboard production. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 78, pp. 1161-1171.

Wang J.Y., Stirling R., Paul I. Morris P.I., Taylor A., Lloyd J., Kirker G., Lebow S., Mankowski M., Barnes H.M., Morrell J.J. (2018) Durability of Mass Timber Structures: A review of the biological risks. *Wood and Fiber Science*, 50:110-127.

Utilisation de la spectroscopie proche-infrarouge portable sur terrain pour l'identification des bois précieux de Madagascar et de ses potentiels bois de substitution en vue de leurs gestions durables

RANDRIAMBININTSOA Tiavina¹, RASOAMANANA Lalaina Patricia¹, CHAIX Gilles², RAMANANANTOANDRO Tahiana¹

¹Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Foresterie et Environnement, Antananarivo 101, Madagascar

²UMR AGAP Institut, Université de Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

randriambinintsoat@gmail.com

Mots clefs : spectrométrie proche infrarouge ; portable ; terrain ; discrimination ; bois précieux ; bois de substitutions ; Madagascar.

Contexte et objectifs

Les bois précieux de Madagascar appartenant aux genres *Dalbergia* et *Diospyros*, constituent une catégorie de produits ligneux très appréciés et fortement commercialisés en raison de diverses qualités intrinsèques intéressantes dont principalement la densité, la faible porosité, la durabilité et la couleur (Schuurman et Lowry 2009, Randriamalala et al. 2010, Barret et al. 2010, Ramananantoandro et al. 2013, Degen et al. 2013). Une recrudescence importante de leur exploitation illicite a été rencontrée ces dernières années malgré maintes balises réglementaires mises en place. En effet, le commerce illégal de ces bois précieux s'est poursuivi sans relâche, car les permis sont fréquemment falsifiés pour indiquer que le bois expédié a une origine différente ou identifié sous un faux nom afin d'éviter les difficultés aux points de contrôle dans les ports de transfert (Hassold et al. 2016). Il est alors difficile d'appliquer les réglementations CITES et d'instaurer un Avis de Commerce Non Préjudiciable en vue de la gestion durable de ces ressources en bois précieux de Madagascar sans un outil d'aide pour permettre leurs identifications. Il est alors primordial pour les services forestiers d'avoir la capacité d'identifier les espèces exploitées pour vérifier si ce sont des espèces autorisées à l'exploitation, en sortie de forêt, durant le transport, lors de la vente et/ou avant l'exportation.

Des études ont déjà été faites avec l'utilisation de la SPIR dans des conditions en laboratoire dans le but d'identifier les essences de bois précieux à partir de spectre de bois uniquement. Les résultats obtenus ont été très prometteurs, avec l'utilisation du DLP® NIRscan™ Nano (Texas instruments Inc., Texas, USA). En vue de pouvoir utiliser la SPIR sur le terrain, l'équipe a travaillé sur un autre spectromètre portatif similaire au NanoNIR qui est l'innospectra NIR-S-G1, car ce spectromètre reflète plus nos attentes en vue de l'utilisation de la SPIR en tant qu'outil portable sur terrain. En effet, l'innospectra est doté d'une connexion Bluetooth et peut par conséquent être utilisé directement avec un smartphone (sans besoin de câble ni d'ordinateur). Il possède aussi une coque externe assurant sa protection.

Des micro-carottes de bois appartenant aux genres *Dalbergia* et *Diospyros* et à 6 autres espèces de substitutions potentielles ont été prélevées dans les forêts malgaches. En premier lieu, des spectres des échantillons ont été mesurés avec le NanoNIR. En deuxième lieu, des modèles de discrimination SPIR ont été étalonnés à partir des spectres d'absorbance mesurés sur les échantillons. En troisième lieu, les modèles ont été embarqués dans des smartphones Android

afin de pouvoir les utiliser directement en terrain (dans des conditions hors laboratoire) avec l'Innospectra NIR-SG1.

Matériels et méthode

Appareils de mesure

Pour cette étude, un appareil portable a été utilisé pour la mesure de spectres sur les micro-carottes de bois : le DLP® NIRscan™ Nano (Texas instruments Inc., Texas, USA, Fig. 1). En fait, l'équipe avait travaillé sur un autre spectromètre portable auparavant qui est le Viavi MicroNIR 1700ES (Viavi Solutions, Milpitas, CA, USA). Mais la comparaison entre le MicroNIR et le NanoNIR a montré des potentialités égales entre les deux appareils alors que le NanoNIR est moins couteux.

Pour l'utilisation sur le terrain, un appareil portable similaire au précédent, qui peut être couplé par Bluetooth avec un smartphone, a été utilisé : le micro NIR spectrometer (NIR-S-G1 ; InnoSpectra Corporation, Taiwan, China, Fig. 2).



Fig. 1 : DLP® NIRscan™ Nano (Texas instruments Inc., Texas, USA)

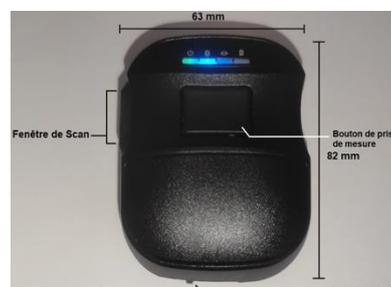


Fig. 2 : micro NIR spectrometer (NIR-S-SG1; InnoSpectra Corporation, Taiwan, China).

Les deux appareils couvrent une longueur d'onde de 900 à 1700 nm (Fig. 3).

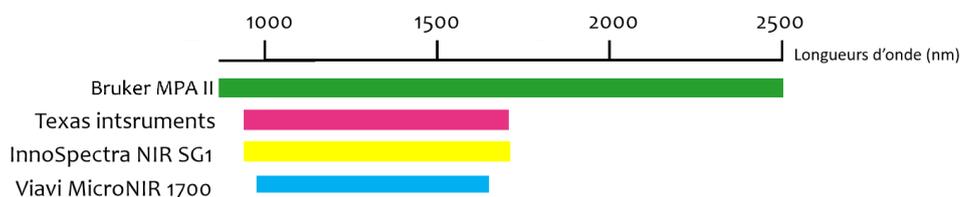


Fig. 3 : longueurs d'onde couvertes selon le capteur de chaque spectromètre

Echantillons d'étude

L'étude s'est focalisée sur des microcarottes de bois : 99 *Dalbergia* ; 107 *Diospyros* et 103 bois de substitutions. Et aussi sur deux régions de Madagascar bien précises : la région MaMaBaie (Makira – Masoala - Baie d'Antongil, Tab. 1) au nord-est de Madagascar et la région Menabe (Tab. 2) dans le sud-ouest de l'île.

Méthodologie

Afin de considérer et pouvoir traiter les facteurs liés à l'humidité du bois, les échantillons de micro-carottes ont été conditionnés sous différents états d'humidité : d'abord à 12% puis à 20% dans une enceinte climatique. Par la suite, comme l'enceinte climatique dont nous disposons au laboratoire ne pouvait pas aller au-delà de 20% d'humidité, on a opté pour l'immersion des échantillons dans de l'eau distillée pendant un certain nombre de jours. 2 états d'humidité ont été considérés. Un état directement après l'immersion et un autre 7 heures après séchage de l'échantillon à l'air libre. Le NanoNIR Texas a été ensuite utilisé afin de mesurer 6 spectres d'absorbances sur la partie duramen de chaque échantillon stabilisé.

Au total, 7 modèles de discrimination ont ensuite été étalonnés avec les échantillons à 12% d'humidité sur le logiciel RStudio en utilisant l'algorithme PLS-DA du package rchemo. La correction EPO (« External Parameter Orthogonalisation ») a été ensuite utilisée pour corriger les modèles et les rendre plus robuste face à la variation de l'humidité des bois, reflétant les conditions réelles rencontrées sur terrain où l'humidité est un facteur d'influence non contrôlable. Le premier modèle est étalonné pour pouvoir identifier à quel genre appartient ou appartiennent le(s) spectre(s) mesuré(s). Les 6 autres modèles (3 modèles par région) seront lancés en fonction du résultat d'identification du premier modèle. Autrement dit : le modèle qui va identifier l'espèce dans le genre *Dalbergia* (modèle 1) ou *Diospyros* (modèle 2) ou substitution (modèle 3) sera lancé suivant le résultat du premier modèle et suivant le choix de la région (Mamabaie ou Menabe).

Tab. 1 : effectifs des micro carottes utilisées et regroupées selon l'espèce (région Menabe)

| Genres | <i>Dalbergia</i> | | | | <i>Diospyros</i> | | | | | | Autres (substitutions) | | |
|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Espèces | <i>lemurica</i> | <i>greveana</i> | <i>chlorocarpa</i> | <i>chermezonii</i> | <i>aculeata</i> | <i>humbertiana</i> | <i>mapingo</i> | <i>pervilleana</i> | <i>platycalyx</i> | <i>torquata</i> | <i>Neobeguea_mahafaliensis</i> | <i>Tetrapteroca rpone_geayi</i> | <i>Cordyla_madagascariensis</i> |
| Nb d'échantillons | 14 | 26 | 11 | 8 | 16 | 9 | 16 | 9 | 17 | 9 | 20 | 22 | 19 |

Tab. 2 : effectifs des micro carottes utilisées et regroupées selon l'espèce (région Mamabaie)

| Genres | <i>Dalbergia</i> | | | <i>Diospyros</i> | | | Autres (substitutions) | | |
|-------------------|------------------|---------------------------------------|--|--------------------|--------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Espèces | <i>baronii</i> | <i>Madagascariensis antongilensis</i> | <i>Madagascariensis madagascariensis</i> | <i>clusiifolia</i> | <i>haplostylis</i> | <i>toxicaria</i> | <i>Intsia_bijuga</i> | <i>Mimusops masoalensis</i> | <i>Uapacca thouarsii</i> |
| Nb d'échantillons | 18 | 13 | 9 | 11 | 12 | 7 | 17 | 10 | 17 |

Ces modèles, sous forme de scripts R, ont été embarqués dans des smartphones en recherchant le moyen le plus simple compatible avec un système Android. Les scripts R sont des lignes de codes développées sur ordinateur avec le logiciel de traitement de données statistiques RStudio. Nous avons opté pour UserLand (un émulateur linux) afin de permettre l'intégration, dans les smartphones, des lignes de code de R de l'ordinateur. Une application par défaut ISCNIRScan (disponible sur Google Playstore) permet de commander le spectromètre NIR-SG1 par Bluetooth via un smartphone Android et de mesurer des spectres sur un échantillon. Les modèles qui ont été embarqués dans les smartphones sont ensuite lancés via l'émulateur UserLand pour déterminer d'abord le genre puis l'espèce auxquelles appartiennent ce(s) spectre(s) mesuré(s). Toutes ces étapes ont été résumées dans une seule application Android dont la conception a respecté la simplicité et la rapidité pour que les agents de contrôles puissent vraiment utiliser la SPIR de la manière la plus efficace sur le terrain.

Résultats et discussions

La performance des modèles étalonnés à partir des 6 spectres d'absorbance mesurés sur les micro carottes de bois est démontrée avec les résultats des Tab. 3 et 4.

Tab. 3 : performances de la SPIR pour l'identification des bois (région Menabe)

| | <i>Dalbergia</i> | <i>Diospyros</i> | Autres (substitution) |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| Nombre d'espèces / d'échantillons | 4 / 59 | 6 / 50 | 3 / 61 |
| Prétraitements/dimension des modèles | Savgol1-snv/26 VD | Savgol / 11 VD | Savgol / 15 VD |
| Pourcentage de bien classés avant EPO | 45,14 | 47,23 | 98,4 |
| Valeur de k | 16 | 7 | 8 |
| Pourcentage de bien classés après EPO | 48,27 | 62,5 | 96,6 |

Tab. 4 : performances de la SPIR pour l'identification des bois (région Mamabaie)

| | <i>Dalbergia</i> | <i>Diospyros</i> | Autres (substitution) |
|---------------------------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Nombre d'espèces / d'échantillons | 3 / 40 | 3 / 30 | 3 / 44 |
| Prétraitements/dimension des modèles | Savgol / 15 VD | Savgol1 / 10 VD | Savgol2-Snv / 10 VD |
| Pourcentage de bien classés | 43,89 | 58,92 | 91,7 |
| Valeur de k | 11 | 7 | 5 |
| Pourcentage de bien classés après EPO | 38,34 | 54,04 | 95 |

Légendes :

- Savgol1-snv : prétraitement des spectres par lissage et première dérivée de Savitzky Golay suivi d'un prétraitement par "Standard Normal Variate »
- Savgol : prétraitement des spectres par lissage et sans dérivation de Savitzky Golay
- VD : nombre de variable discriminante reflétant la dimension du modèle
- k : dimensions de perturbations à retirer par EPO
- EPO : « External Parameters Orthogonalization »

Les modèles étalonnés arrivent difficilement à identifier les micro carottes appartenant aux genres *Dalbergia* et *Diospyros*. Tandis que pour les espèces de substitutions, les modèles arrivent à bien les discriminer à plus de 90% de bien classé. Ceci peut surtout être expliqué par le fait que les bois de substitutions étudiés ici appartiennent à des genres différents : *Cordyla madagascariensis*, *Neobeguea mahafaliensis*, *Tetrapterocarpon geayi* (pour la région Menabe) et *Intsia bijuga*, *Mimusops masoalensis*, *Uapaca thouarsii* (pour la région Mamabaie).

Les modèles embarqués dans le smartphone peuvent par la suite être directement utilisés avec l'innospectra connecté par Bluetooth pour des identifications.

Conclusion et perspectives

Les modèles étalonnés en laboratoire sont portables grâce à l'évolution des spectromètres qui peuvent actuellement être connectés par Bluetooth. En effet, au lieu d'utiliser des spectromètres nécessitant d'être reliés avec un câble sur un ordinateur, les smartphones peuvent aujourd'hui être sollicités car il est possible d'y embarquer les modèles d'identifications et d'utiliser des spectromètres par connexion Bluetooth (Fig. 4). Comme le but principal de l'étude est de pouvoir directement utiliser la méthode de discrimination des espèces sur terrain, d'autres paramètres méritent d'être considérés comme le transfert d'étalonnage entre les deux spectromètres, ainsi que l'influence de la forme des échantillons.

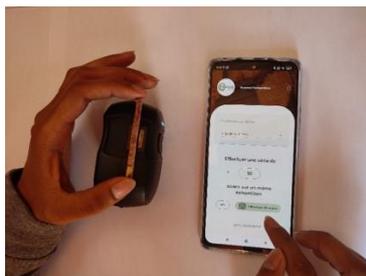


Fig. 4 : utilisation des modèles de discrimination à partir d'un smartphone et d'un spectromètre portable innospectra

Remerciements

Vifs remerciements aux équipes de recherche au sein desquelles se déroulent cette étude : Laboratoire des Sciences du bois (Mention Foresterie et Environnement, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques ; Université d'Antananarivo - Madagascar) ; Plateforme d'histocytologie et d'imagerie cellulaire végétale PHIV (UMR Agap et BPMP) ; Plateau de phénotypage biochimique PPB (UMR Agap), Montpellier, France. La thèse de doctorat de L.P. Rasoamanana est financée par le projet FID2D (Field Identification tool for *Dalbergia*, *Diospyros* and six substitute species) qui est financé l'USAID (United States Agency for International Development) à travers le WRI (World resources Institute) et le projet Hay Tao, et par l'OWSD (Organization for Women in Science for the Developing World). Cette étude est rendue possible grâce au soutien du peuple américain par l'intermédiaire de l'USAID et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'USAID ou du gouvernement des États-Unis.

Références

- Barrett MA, Brown JL, Morikawa MK, Labat J-N, Yoder AD (2010) CITES designation for endangered rosewood in Madagascar. *Science*, 328:1109–1110. pmid:20508116
- Degen B, Ward SE, Lemes MR, Navarro C, Cavers S, Sebbenn AM (2013) Verifying the geographic origin of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) with DNA-fingerprints. *Forensic Sci Int Genet*, 7:55–62. pmid:22770645
- Hassold S, Lowry PP II, Bauert MR, Razafintsalama A, Ramamonjisoa L, Widmer A (2016) DNA Barcoding of Malagasy Rosewoods: Towards a Molecular Identification of CITES-Listed *Dalbergia* Species. *PLoS ONE*, 11(6) : e0157881. doi : 10.1371/journal.pone.0157881
- Ramananantoandro T, Ramanakoto MF, Rajemison AH, Eyma F (2013). Relationship between density and aesthetic attributes of wood and preference of Malagasy consumers. *Annals of Forest Science*, 70:649–658.
- Randriamalala HF, Liu Z (2010). Rosewood of Madagascar: Between democracy and conservation. *Madag Conserv Dev*, 5: 11–22.
- Schuurman D, Lowry PP (2009) The Madagascar rosewood massacre. *Madag Conserv Dev*, 4: 98–102.

Regenerative quality of wood cladding

BRUN Géraldine¹, ALMEVIK Gunnar¹, BJÖRLING Nils², JOHANSSON Karin¹

¹Department of Conservation, University of Gothenburg

²Chalmers University of Technology

geraldine.brun@gu.se

Key words: wood cladding; durability; traditions; weathering; performance; regenerative architecture; quality.

Background and goals

Regenerative architecture seeks to go beyond sustainability and insists on the importance of a collaborative relation between built and natural environments. Instead of doing less harm, the act of building can impact positively our social and natural capital in the long-term (Cole 2012).

In ecology, regeneration refers to ecosystems replenishing what is being eaten, disturbed, or harvested. Wood as a construction material offers the opportunity to build in a regenerative and circular way because it is biodegradable and creates habitats where it is grown.

Wood cladding is an optimal platform for reflecting upon regenerative construction materials and methods because it is the interface between a building and its natural environment. It is often referred to as a sacrifice layer because it is among the parts of the envelope the most exposed to degradation mechanisms. Its aesthetic dimension makes it an important architectural element, yet it becomes a paradox that is not expected to last but to which special care is given.

Interest in using wood for cladding has increased dramatically in Europe over the past 20 years (Hill *et al.* 2022). The performance of timber cladding depends on the durability of the wood, defined as the resistance to wood-destroying agents, as well as its permeability to water and the availability of moisture and wood-destroying agents in the end-use application (Kutnik *et al.* 2014). Traditionally, in Scandinavia for example, coating is used to decrease biodegradation and increase dimensional stability (Sivertsen 2010). Anyhow, the use of uncoated wood cladding has become more popular due to its low maintenance requirements (Hill *et al.* 2022). The absence of painting or treatment reduces climate gas emissions (Plessner *et al.* 2013). However, uncoated wood changes aspect over time in a non-uniform way due to the combination of chemical, mechanical and light energies (Feist 1990). Iron sulphate treatments can be used to obtain more controlled weathered aspect.

The European standard EN 350:2016 ranks durability against wood-decay organisms of various species. The ones classified with moderate to low natural durability are nowadays commonly modified to prolongate their technical and aesthetic service life in outdoor use.

As wood from species considered non-durable has been cladding facades, raw or coated with traditional paints, for centuries, the relevance of our modern understanding of durability can be questioned. For example, Black Alder (*Alnus Glutinosa*) is ranked as non-durable in EN 350:2016, meaning that its heartwood is prone to decay by microorganisms. Yet, it has been used as cladding in different places in Europe such as France, Norway and Sweden. Scottish Pine (*Pinus Sylvestris*) was traditionally favoured for cladding in Sweden but appears as a species with highly variable durability in EN 350:2016. This raises the question of the existence of correlations between its growing conditions, anatomical features, processing methods and physical-mechanical properties.

This project has its roots in traditional crafts methods and is based on the assumption that they can inspire more responsible practices in the construction sector. It aims at characterizing the quality of wood panels that can clad facades for longer than it takes for trees to regenerate, without generating wastes, and while making both our natural and built environments resilient.

Approach and methods

A number of studies has been scrutinizing both natural and conferred durability of wood under simulated or controlled conditions. There are proportionally few published studies based on real objects as it is challenging to track the exposure level of wood claddings in-use and thus to define the specific parameters allowing for good performance and long lifespan.

This project is based on the perpetuation of traditional knowledge making, where In-situ evidence informs us of the advantages or disadvantages of methods in the long-term. It bridges traditional knowledge between different countries to develop resilience in a changing climate.

The main research method is the observation of existing objects in Scandinavia and in France, where cladding facades with wood is an early example of a resource-saving measure in areas of scarce timbers or harsh weather (Rentzhog 1986, Godal 2012). Study cases are preserved and damaged traditional claddings, to be understood as cladding types representative of a specific area, manufactured from local resources and in small-scale production chains.

The study of those claddings can be summarized as follow:

- Architectural and technical observations: Typology of the facade, of the cladding and of the claddings' elements including eventual coatings or treatments.
- Crafts based observations: Tool marks and wood features such as growth rings width and knots repartition.
- Scientific inspection: Dendrochronology analyse and wood species identification.
- Complementary information: Interviews, archives, regulations, norms, conditions of the natural habitat of the trees.
- Holistic interpretation based on collected data and literature.

First, a forensic perspective is adopted to conduct investigations and try to “reconstruct the course of events and understand the motivations” (Almevik 2012). Then, complementary information from different sources is gathered. Communication with scientists from other disciplines such as biology and chemistry are valuable for interpreting results. Collaborations with stakeholders in the fields of building and gardening crafts as well as forestry will allow to consider wood quality in a wider picture and from a circular use perspective.

Pre-industrial wood claddings of Scottish Pine are still well represented in Sweden and their characteristics must be better understood to draw conclusions regarding quality requirements for long lifespan. In Champagne in France, there is a tradition of manufacturing “tavillon” claddings from deciduous trees, such as Oak, Populus and Alder. The knowledge of using those different species for cladding, built up through centuries, is relevant to keep alive for helping us developing more resilient constructions methods in symbiose with local ecosystems.

First results

The investigated panel samples present different kind and levels of deterioration. The first analysis showed that rot is not the only cause of degeneration of cladding and that vulnerability to wood-destroying organisms does not necessarily impact the technical performance of cladding (Brun 2023).

In Champagne, preserved "tavillons" of Alder and Populus, manufactured with circular saw, replaced Oak "tavillons" which were split from log sections with "depertoirs". The thin and short uncoated "tavillons" dry fast and without much deformation. Alder wood suffers a great mass loss due to fungal attack when in ground contact, but its performance as thin cladding is mainly altered by abrasion around fasteners (Brun, 2023) (Fig.1 and 2). In Sweden, Alder panels are sometimes found among Spruce panels and seem to have been intended as an equivalent. Both in France and Sweden, Alder cladding is attacked by wood boring beetles, but this seems to alter its performance as an aesthetic layer more than as a protective layer (Brun, 2023).



Fig. 1 : West façade of a house built with timber-framing and wattle and daub filling, covered with "tavillons", in Frampas, Champagne, France.



Fig. 2 : A "tavillon" of Alder from the façade on Fig. 1 is showing a nail hole, which has become bigger and where crack formed from it to the edge.

The gathered samples of Scottish Pine are likely original panels from Swedish edifices built in 1679, 1780 and 1870. They are illustrating the durability difference between heartwood and splint wood but are also showing that deformation can be an important factor to consider for performance of cladding (Brun 2023). The cladding of Kvibergsnäs stable (Fig. 3) is partly issued from trees with an extremely slow growth rate, presenting tight growth rings with relatively low density, which can be identified as "hunger wood" in Swedish. This implies that the fibre walls are thinner than usually, possibly allowing a more even moisture distribution and thus less stress and structural damage under wetting and drying cycles. The studied overboards are 30mm thick, with good form stability and seem to have the ability to dry fast.



Fig. 3 : The east façade of Kvibergsnäs stable built in the 1780s, Gothenburg, Sweden.

Coating

The samples of Scottish Pine are showing traces of traditional red Falu paint. It seems that Falu paint was not used for aesthetic reasons only but that the iron oxide pigment also confers a protection against decay. The alteration of this type of breathable paint does not cause any damage to the cladding since moisture is not trapped inside the wood.

Discussion and tentative findings

Biodegradation is a threat to wood cladding but also a chance to build without creating wastes (Brun 2023). "Tavillons" of Alder either fall off or vanish after long weathering. This illustrates what can be called a sacrifice layer, made from available resource, and designed to last for the time it takes for it to regenerate, which is 60 to 70 years in France. Studied Scottish Pine panels

are suggesting that growth speed can influence wood properties connected to durability and performance. Long rotation periods possibly allow cladding of Scottish Pine to be reliable in the long-term both as an aesthetic and as a protective layer.

Wood cladding can be a platform for implementing innovative strategies of production and maintenance, based on traditional craft rationality. An example is to consider wooden facades as dynamic elements in our landscape, comparable to urban parks or gardens, whose generation, care, and regeneration are entrusted to one dedicated team of craftspersons.

Acknowledgements

This PhD project is financed by the Institute of conservation of the University of Gothenburg and hosted by the Craft Laboratory in Mariestad, Sweden.

References

Almevik G. (2012) Byggnaden som kunskapskälla (The building as a source of knowledge) (Publication No. 27). Doctoral dissertation, University of Gothenburg. Acta Universitatis Gothoburgensis. <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/28072>

Brun G. (2023, September 22) When wood cladding degenerates: lessons on durability from traditional wood claddings after long weathering in real conditions (Exhibition and extended abstract presentation). Biennial International Conference for Craft Sciences, Mariestad, Sweden.

Cole R.J. (2012) Regenerative design and development: current theory and practice. Taylor & Francis, 40(2012), 1-6.

Feist W.C. (1990) Outdoor wood weathering and protection. Archaeological wood, properties, chemistry, and preservation. Advanced in Chemistry Series, 225, 263-298.

Godal J.B. (2012) Tekking og kledning med emne frå skog og mark: frå den eldre materialforståinga (Roofing and cladding with objects from forest and land: from the old material comprehension). Akademika forlag.

Hill C., Kymäläinen M., Rautkari L. (2022) Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment. Journal of Materials Science, 57(20), 9031-9076.

Kutnik M., Suttie E. Brischke C. (2014) European standards on durability and performance of wood and wood-based products—Trends and challenges. Wood Material Science & Engineering, 9(3), 122-133.

Plesser T.S., Kristjansdottir T., Tellnes L., Flæte P.O., Gobakken L.R., Alfredsen G. (2013) Miljøanalyse av trefasader (Environmental analyse of wooden facades). SINTEF Akademisk forlag.

Rentzhog S. (1986) Stad i trä - panelarkitekturen: ett skede i den svenska småstadens byggnadshistoria (Town in wood – panels' architecture: a stage in the Swedish history of buildings in small towns). Nordiska museets handlingar, 2. uppl. (Original work published 1937).

Sivertsen M.S. (2010) Liquid water absorption in wood cladding boards and log sections with and without surface treatment (Publication No. 2010:6). Doctoral dissertation, Norwegian University of Life Sciences. Norwegian University of Life Sciences. <http://hdl.handle.net/11250/2429312>

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.

Evaluation du taux de restitution d'énergie en mode I d'un LVL de peuplier

PEIGNON Axel¹, SERRA Joël¹, GELARD Léo¹, CANTAREL Arthur¹, EYMA Florent¹,
CASTANIE Bruno¹

¹Institut Clément (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, INSA, ISAE-Supaéro,
INSA, IMT Mines Albi, UPS, Toulouse, France
peignon@insa-toulouse.fr

Mots clés : Bois ; Placages ; Taux de restitution d'énergie ; Essai DCB (Double Cantilever Beam) ; Délaminage ; Pontage de Fibres ; Mode I

Contexte et objectifs

Le lamibois (LVL) et le contreplaqué sont des produits composites structurels fabriqués à partir de fines feuilles de bois déroulées, appelées placages et assemblées avec un adhésif. Le contreplaqué a une stratification croisée, ce qui signifie que les placages longitudinaux et transversaux sont alternés dans tout le stratifié. Dans le LVL, contrairement au contreplaqué, les fibres du placage sont principalement orientées dans la même direction. Pour un usage structurel, certains LVL peuvent avoir quelques placages à fils croisés. Le LVL et le contreplaqué, du fait de leur fabrication, offrent la possibilité de sélectionner les placages ne présentant pas de défauts, présentent des caractéristiques mécaniques statiques comparables, voire supérieures, à celles du bois massif (Leicester et Bunker, 1969). Par ailleurs, des études récentes ont montré que le LVL présente aussi un potentiel mécanique intéressant pour des applications de crash ou d'impact (Guérou et al. 2021, Susainathan, 2017). Aussi, en se basant sur l'utilisation de ces résultats, la stratégie de modélisation dite Discrete Ply Model (Bouvet et al. 2009, Serra et al. 2016) a été envisagée pour modéliser les scénarios de rupture des structures à base de contreplaqué, aussi bien en statique qu'en dynamique. Cette stratégie repose sur uniquement 13 paramètres dont les taux de restitution d'énergie aux interfaces qu'il convient d'identifier spécifiquement pour les applications de composite bois.

Pour caractériser le taux de restitution d'énergie en mode I, mode nécessitant le moins d'énergie pour ce matériau et qui est donc le plus compromettant pour l'intégrité de la structure, l'essai DCB (Double Cantilever Beam) est privilégié. Peu d'auteurs se sont intéressés aux essais DCB sur des interfaces de bois collés, que ce soit pour du LVL ou du contreplaqué. El Moustaphaoui et al. (2021) ont caractérisé la ténacité d'une interface de contreplaqué de ceiba de 9 plis. Baba et al. (2010) se sont intéressés au contreplaqué de hêtre, et Xiao et al. (2023) se sont intéressés au LVL de peuplier. Cependant, les études précédentes ne se concentrent qu'aux interfaces 0°/0°. Or, dans le cas de stratifiés tels que le contreplaqué, le délaminage se produit majoritairement aux interfaces 0°/90° en raison du cisaillement interlaminaire maximal pour des interfaces orientées perpendiculairement. Ce phénomène est bien connu dans le domaine des composites (Gay 2014) mais très peu étudié pour le bois.

Cette étude vise donc à caractériser les taux de restitution d'énergie en mode I pour deux interfaces différentes : une interface 0°/0° et une interface 0°/90°.

Matériel et méthodes

L'essai Double Cantilever Beam (DCB) consiste à appliquer une charge aux extrémités d'une éprouvette qui entraîne la propagation de la fissure en mode pur I (Fig. 2). Des placages de bois

de peuplier (*Populus*) Koster de 1mm ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes DCB. Les placages, fournis par le laboratoire LaBoMaP de Cluny, ont été produits à l'aide d'une dérouleuse. Deux configurations ont été réalisées et sont illustrées sur la Fig. 1 :

- Un contreplaqué 8 plis avec une configuration $[0^\circ]_8$ pour l'interface $0^\circ/0^\circ$.
- Un contreplaqué 9 plis avec une configuration de stratification $[0^\circ_4, 90^\circ, 0^\circ_4]$ pour l'interface $0^\circ/90^\circ$.

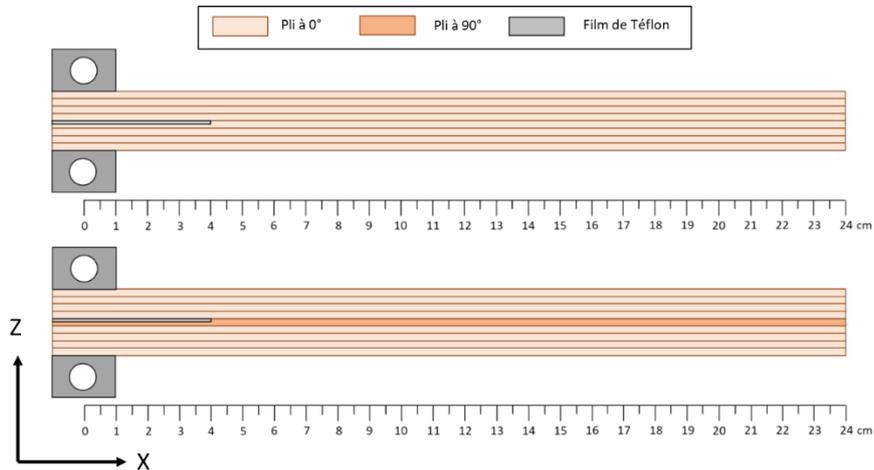


Fig. 1 : Configuration des éprouvettes DCB de la série $0^\circ/0^\circ$ (haut) et $0^\circ/90^\circ$ (bas)

Un total de 12 éprouvettes par configuration ont été découpées au laser. Les éprouvettes DCB ont des dimensions nominales de $250(L) \times 25(B) \times 8\text{mm}(H)$ pour la série $0^\circ/0^\circ$ et de $250(L) \times 25(B) \times 9\text{mm}(H)$ pour la série $0^\circ/90^\circ$ (Fig. 2). L'éprouvette est mise en place avec une longueur de fissure initiale (a_0 sur la Fig. 2).

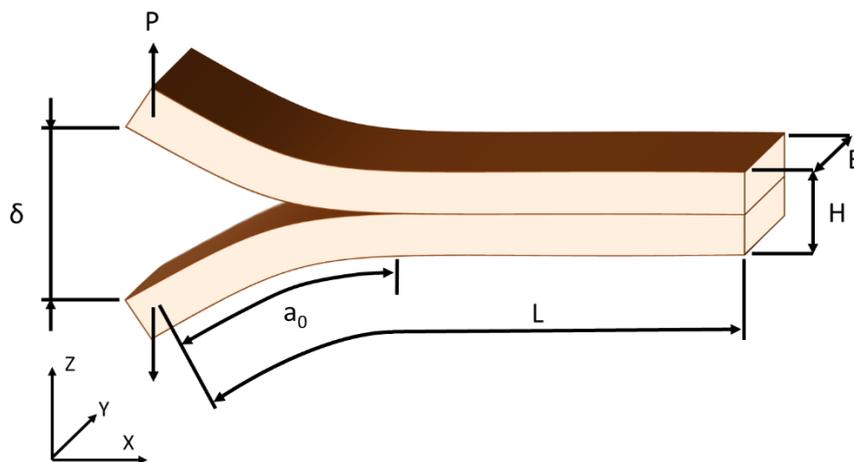


Fig. 2 : Schématisation de l'essai DCB

Un script python a été utilisé pour suivre la pointe de la fissure en utilisant la corrélation d'image (DIC) pour chaque éprouvette. Pour obtenir le taux de restitution d'énergie, il est nécessaire d'établir un lien entre la longueur de fissure, la courbe force (P sur la Fig. 2) – déplacement (δ sur la Fig. 2) et l'équation d'Irwin-Kies (1954). Dans cette étude, une seule méthode sera utilisée pour établir cette relation : la méthode de calibration de complaisance modifiée (MCC) (ASTM D5528 : ASTM 2010). Cette méthode a été comparée à la méthode issue de la théorie de la poutre corrigée (ISO 15024 : ISO 2001) ainsi que la méthode de calibration de complaisance (CC) (ASTM D5528 : ASTM 2010). Les écarts constatés sur la valeur moyenne de G_{Ic} calculée avec la méthode MCC sont en moyenne de l'ordre de 2% avec la méthode CC et 12% avec la théorie des poutres corrigée. Nous faisons le choix par la suite de ne présenter que la méthode

MCC. Cette méthode est privilégiée car c'est celle qui nécessite les hypothèses les plus faibles sur la relation entre la complaisance et la longueur de la fissure.

Résultats et discussion

Les courbes P- δ obtenues lors des essais, sont illustrées par série sur les Figures 3 et 4. On observe déjà une variabilité plus importante pour la série 0°/0° (Fig. 3) comparé à la série 0°/90° (Fig. 4). En moyennant les valeurs pour l'ensemble des éprouvettes, on observe que la valeur de G_{Ic} pour la série 0°/0° donne une valeur plus élevée que pour la série 0°/90°. Cela peut s'expliquer par le fait que du pontage de fibre se produit dans la série 0°/0° (zone A sur la Fig. 5). Le pontage de fibre est plus important dans le bois que dans les composites classiques car l'angle de plongée des fibres est bien supérieur à celui rencontré dans ces derniers (Pramreiter et al., 2020). Les valeurs moyennes du taux de restitution d'énergie obtenues sont les suivantes : $G_{Ic-0°/0°} = 422 \text{ J/m}^2 \pm 30\%$ et $G_{Ic-0°/90°} = 247 \text{ J/m}^2 \pm 21\%$.

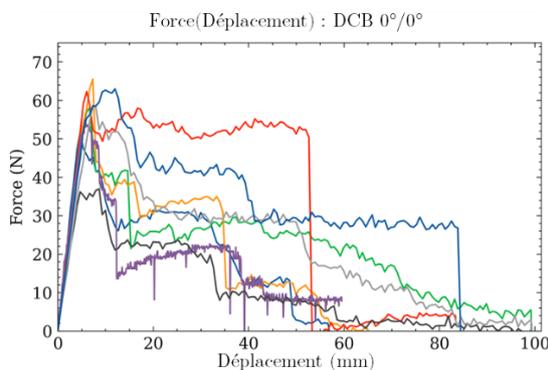


Fig. 3 : Courbes P- δ pour la série 0°/0°

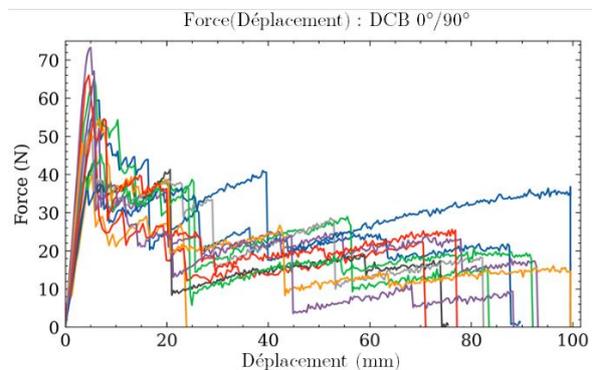


Fig. 4 : Courbes P- δ pour la série 0°/90°

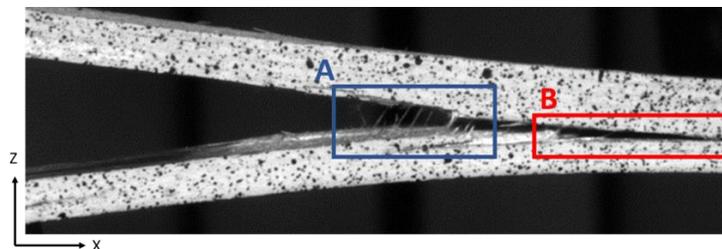


Fig. 5 : Éprouvette post mortem n°4 de la série 0°/0° présentant du pontage de fibres (A) et une fissure migrant hors de l'interface initiale (B)

Dans un second temps, les faciès de rupture des éprouvettes de la série 0°/90° ont été analysés pour mettre en évidence le chemin de la fissure et l'apparition de différents phénomènes physiques. Pour la série 0°/0° la fissure se propage soit à l'interface, soit elle bifurque hors du plan initial (zone B sur la Fig. 5). Notons que la fissure ne semble jamais se propager dans la colle. La rupture est soit adhésive entre le bois et la colle, soit cohésive dans le bois, mais il ne semble pas y avoir de rupture cohésive dans la colle lorsque l'on étudie les faciès de rupture au microscope. Ce phénomène a déjà été observé dans les assemblages bois où le joint de colle est connu pour être plus résistant que le bois (Forest Products Laboratory USDA Forest Service, 2010). Afin de calculer des valeurs de G_{Ic} en distinguant les différents phénomènes de propagation sur chaque éprouvette, différents scénarios ont été identifiés pour classer la propagation de fissure pour les éprouvettes 0°/90° :

- Fissure à l'interface 0°/90° (zone 4 sur la Fig. 6)
- Propagation dans le pli de 90° (zone 5 sur la Fig. 6)
- Migration de la fissure hors du plan ou événements particuliers (zone B sur la Fig. 5, zone 3 sur la Fig. 6)

Cette distinction par zone est illustrée sur la Fig. 6.

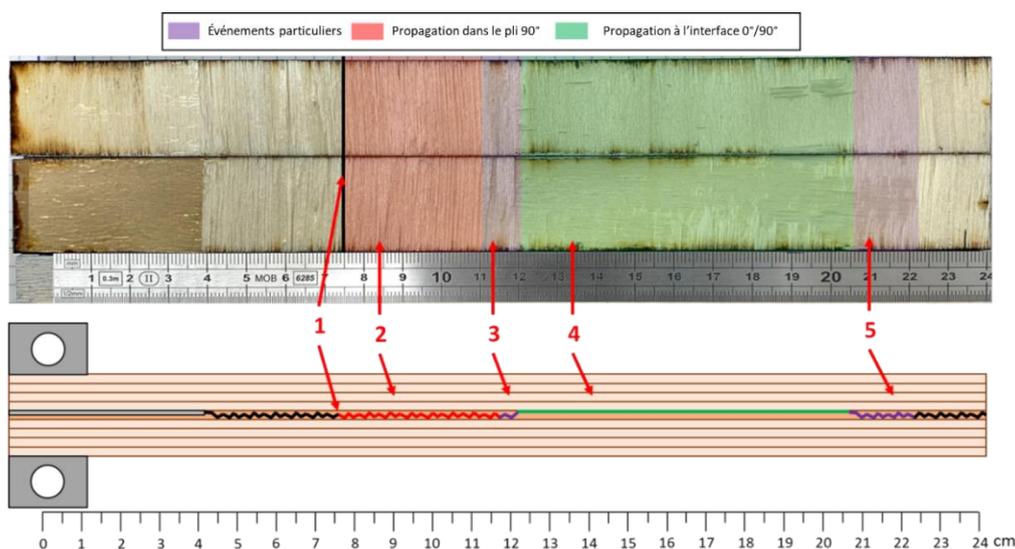


Fig. 6 : Interfaces supérieures et inférieures post mortem de l'éprouvette 0°/90° n°4 avec identification des zones de propagation (en haut) et illustration du chemin de la fissure et des zones de propagation à travers la même éprouvette (en bas).

La valeur du taux de restitution d'énergie critique dans le pli de 90° obtenue est la suivante : $G_{Ic-90^\circ\text{-pli}} = 247 \text{ J/m}^2 \pm 24\%$. La valeur du taux de restitution d'énergie critique à l'interface 0°/90° obtenue est la suivante : $G_{Ic-0^\circ/90^\circ\text{-interface}} = 62 \text{ J/m}^2 \pm 28\%$.

Conclusion et perspectives

Dans la littérature les valeurs de G_{Ic} sur une interface 0°/0° de LVL ou de lamellé-collé se trouvent en moyenne entre 20 et 1200 J/m^2 . On peut noter que les écarts importants constatés entre les auteurs s'expliquent principalement par le type de bois et le type de colle utilisés. En effet, la ténacité d'un assemblage collé est fortement corrélée à la nature du couple bois-colle, la rugosité du bois, l'épaisseur du joint de colle ou le module d'Young du matériau caractérisé. De plus, une forte dispersion est attendue sur des essais DCB (Pluinage, 1992). On ne trouve cependant pas dans la littérature de valeur de G_{Ic} pour une interface 0°/90° dans le cas du contreplaqué. Or, compte tenu des résultats obtenus lors de cette étude, on constate que la valeur de G_{Ic} pour une interface 0°/90° ($G_{Ic-0^\circ/90^\circ\text{-interface}} = 62 \text{ J/m}^2 \pm 28\%$) est plus faible que pour une interface 0°/0° ($G_{Ic-0^\circ/0^\circ} = 422 \text{ J/m}^2 \pm 30\%$) de par le fait que le pontage de fibre est moins présent que pour une interface 0°/0°.

Pour les éprouvettes avec une interface 0°/90°, la méthodologie mise en place dans cette étude permet d'extraire 2 taux de restitutions d'énergie, cette distinction offre la possibilité de simuler le délaminage intra pli et inter pli avec deux valeurs de ténacité distinctes (Peignon et al. 2023).

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

- Baba MN, Dogaru F, Curtu I, Dinu G, Bayer M (2010) Experimental Determination of Interlaminar Fracture Toughness of Wood Laminated Composite Specimens under DCB Test. *Materiale Plastice*, 5.
- El Moustaphaoui A, Chouaf A, Kimakh K (2021) Experimental and numerical study of the delamination of Ceiba plywood under mode I, mode II and mixed-mode (I + II) loading using the DCB, ELS and MMF tests. *International Journal of Fracture*, 213(1):1-20.
- Forest Products Laboratory USDA Forest Service (2010) Wood handbook : Wood as an engineering material (FPL-GTR-190; Numéro FPL-GTR-190, p. 509). Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Gay D (2014) *Composite Materials : Design and Applications* (3rd edition). CRC Press.
- Guélou R, Eyma F, Cantarel A, Rivallant S, Castanié B (2021) Crashworthiness of poplar wood veneer tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 147, 103738
- Irwin GR, Kies JA (1954) Critical energy rate analysis of fracture strength. *Weld Journal*, 33 *Welding Research Supplement*, 193-198.
- Leicester RH, Bunker RC (1969) Fracture at butt joints in laminated pine. *Forest Prod. J.* 19(2):59-60.
- Pluvinage G (1992) *La rupture du bois et de ses composites*. Cépaduès-Éditions.
- Pramreiter M, Bodner SC, Keckes J, Stadlmann A, Kumpenza C, Müller U (2020) Influence of Fiber Deviation on Strength of Thin Birch (*Betula pendula* Roth.) Veneers. *Materials*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma13071484>
- Peignon A, Serra J, Gélard L, Cantarel A, Eyma F, Castanié B (2023) Mode I delamination R-Curve in poplar laminated veneer lumber. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103982. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103982>
- Serra J, Bouvet C, Castanié B, Petiot C (2016) Scaling effect in notched composites : The Discrete Ply Model approach. *Composite Structures*, 148, 127-143. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.062>
- Susainathan JP (2017) *Development and characterization of Wood Based Eco-structure*, thèse de l'Université de Toulouse.
- Xiao Z, Li C, Shu B, Tang S, Yang X, Liu Y (2023) Experimental Study of Mode-I and Mode-II Interlaminar Fracture Characteristics of Poplar LVL. *Journal of Renewable Materials*, 11(1):245-255. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.020751>.

Projet COPEAU BOIS : modification de bois massif pour une utilisation en lunetterie

LAGARDE Hélène¹, ROY Philippe², BELLONCLE Christophe¹, BLANCHARD Philippe¹.

¹Ecole Supérieure du Bois, Nantes, France

²MB Production, Nantes, France

helene.lagarde@esb-campus.fr

Mots clés : Adhésifs ; Biopolymères ; Bois composite ; Bois souple ; Cintrage ; Compression ; Revêtements.

Contexte et objectif

Le projet Copeau Bois réunit deux entreprises de la région des Pays de la Loire [MB Production (44) et Bois Cintré du Bocage (85)] ainsi qu'un laboratoire de recherche [LIMBHA – ESB (44)] afin de créer un ou plusieurs matériaux composites innovants, conçus à base ou à partir de bois, pour partie ou en totalité, et utilisables pour la production de montures de lunettes. Ce projet est financé par la Région des Pays de la Loire et a débuté en mai 2021.

L'innovation est issue d'une démarche de R&D qui allie connaissances actuelles sur le bois (composite, collé, massif, souple) au développement de nouveaux composites bois et polymères naturels ou biosourcés. Le bois utilisé pour ce projet est issu de ressources locales (essence et production). L'objectif de ce projet est de modifier les propriétés du bois au travers d'une approche physico-chimique.

Matériel et méthode

Mise en place d'un processus d'innovation

Afin de mener à bien ces recherches, une première étape d'innovation pilotée par l'ESB et réunissant les trois acteurs du projet est faite. Dans un premier temps, elle a consisté en une veille sur les productions existantes ou connexes dans l'univers de la lunetterie. Ensuite, une initiation à la démarche innovante a été présentée sous forme d'une « histoire en 3 chapitres » (Fig. 1).

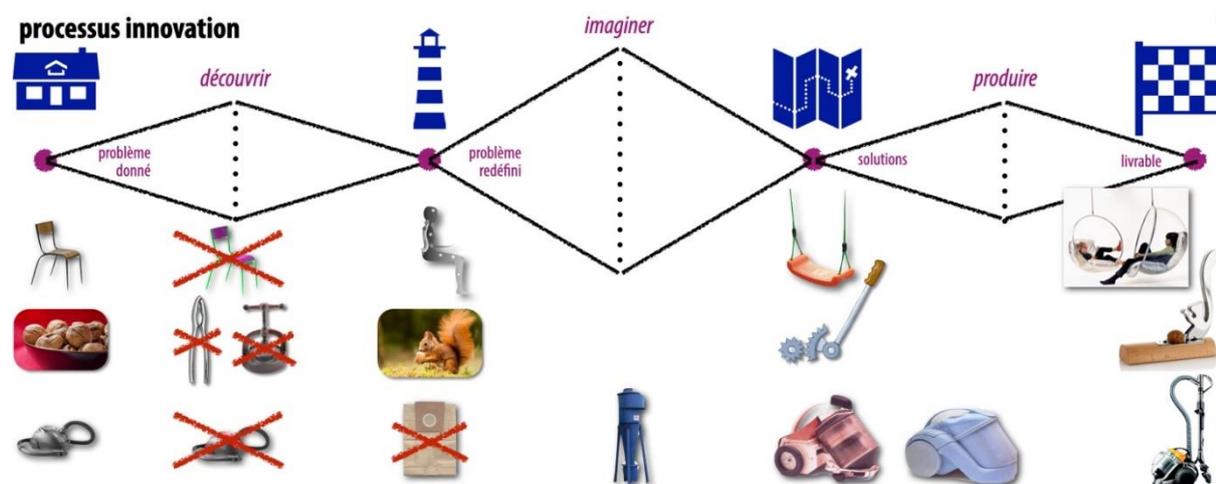


Fig. 1 : Explication d'un processus d'innovation à mettre en œuvre (Blanchard, 2018).

- Le premier temps doit permettre d'identifier plusieurs *Phares*. En phase de découverte, c'est la définition d'un challenge à relever (ne pas trouver de solutions).
- Le deuxième temps est consacré à rechercher des *Cartes au trésor*. En phase d'imagination, elles traduisent l'élaboration de concepts (sous forme de fiches-idées) pour atteindre le phare choisi.
- Enfin, le troisième temps est dédié au *Trésor ou drapeau d'arrivée*. En phase de production, il marque la fourniture du livrable.

L'exercice se déroulant sur trois journées avait pour objectif de bien cerner :

- Le besoin (et l'objet résultant) du projet,
- La matière à utiliser (sous quelle forme),
- Le procédé de transformation novateur et performant.

À la fin de la troisième séance, un tableau récapitulatif des propositions a été établi (Tab. 1).

Tab. 1 : Récapitulatif des propositions trouvées lors du processus d'innovation.

| | besoin (objet) • mercredi 5 mai 2021 | matière • mercredi 26 mai 2021 | procédé • mardi 1er juin 2021 |
|----------|---|--|---|
| ★★★ | A. modèle "ajustable" B. réduction du nombre de pièces | F. flexibilité (ensemble ou branches) | K. bon rendement matière L. répétable M. identifiable |
| ★★ | C. verres et montures interchangeables | G. copeau monobloc formable | N. simple |
| ★ | D. pliable (tente 2 secondes) E. personnalisation, design | H. éco-circulaire, biosourcé, recyclable I. bois "transparent" J. choix d'un flant efficace | O. "green", vertueux, éco-circulaire P. robuste Q. polyvalent R. intégrable |
| ☆ | <ul style="list-style-type: none"> • utiliser du bois biosourcé • imperdable • ergonomiques (adaptées, ajustables) • confortables (les oublier) • jouer avec la symbolique du bois • correction efficace • vision parfaite (ni poussière, ni buée) • captation d'énergie (vers l'autonomie) • autocorrection devant un écran (Apple) • plus ou moins monobloc • articulation des branches • vintage : monocle, pince-nez • monture évolutive (au fil des humeurs) • matériau qui change de couleur • jouer avec le positionnement du verre | <ul style="list-style-type: none"> • durée de vie du produit • simplicité (obtention et usage) • motif "bois" (naturel modifié ou ajout de décor) • storytelling sur l'objet final | <ul style="list-style-type: none"> • pas cher (mise en place, pièces finies) • automatisé • rapide • compatible avec la série (2 000 à 5 000 pièces) • incontournable • partie d'un tout (process global) • s'inspirer ailleurs que dans la lunetterie • assemblage MDF <=> acétate • proche de l'univers du jouet |
| concepts | 1 verre clipsable (c) 2 branches emboîtables (d) 3 bandeau monobloc (b) | 4 renforts partiels pour plis (f) 5 formage du copeau (g) 6 transformation copeau traité (g) 7 nouvel acétate ou autre (h) 8 suite échantillons pré-compressés (f) 9 imprégnations différentes (j) | 10 clipsable par le bas (e) 11 utilisation des fibres de cellulose pour thermoformer ensuite (h) 12 variations placages sur intissés (f) 13 intissés en cellulose (h) 14 voie enzymatique (h) |

Ce tableau présente les idées qui ont découlé de cet exercice avec non seulement un classement en fonction des trois objectifs de départ mais aussi avec un classement par ordre d'importance de l'idée par étoile. Pour définir les concepts d'étude, la priorité a été donnée aux idées avec le nombre d'étoiles le plus important.

Mise en place des expérimentations : processus de compression puis de réassemblage

Des travaux précédents au sein du laboratoire LIMBHA ont démontré la possibilité de former des baguettes en bois qui sont souples (Irle 2019). Ce résultat peut être obtenu par un jeu de compression, découpe et recollage (Fig. 2, 3).

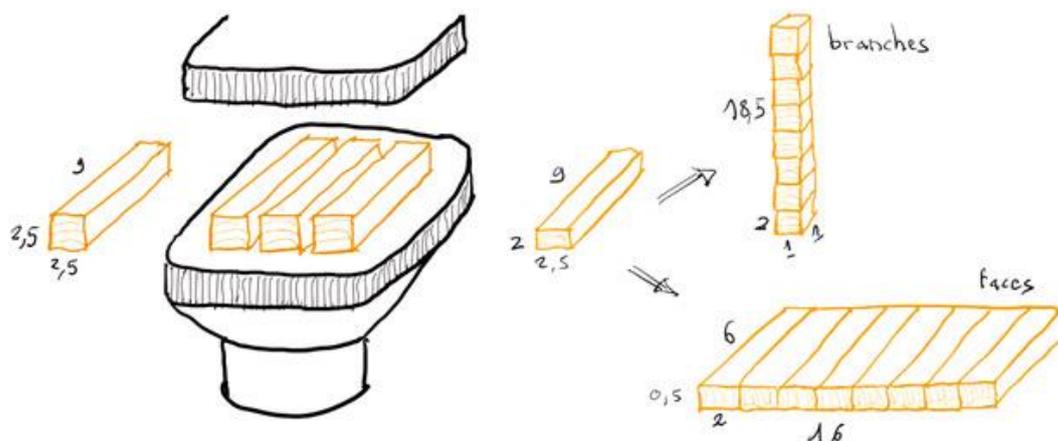


Fig. 2 : Schéma du processus de fabrication du nouveau composite bois.

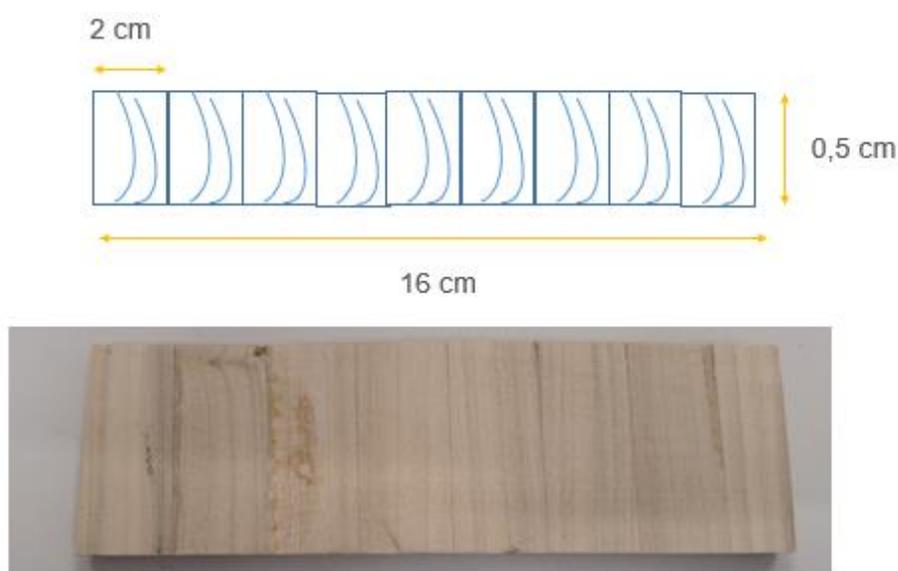


Fig. 3 : Schéma d'une plaquette de composite bois vue de côté (en haut) et image de cette plaquette vue d'en haut.

Résultats et discussion

Une vingtaine de baguettes flexibles pouvant être utilisées comme branches sont développées. Le bois massif est dans un premier temps comprimé dans le sens radial avec un taux de compression finale de 20%. Ce bois transformé est ensuite coupé en cube d'environ 2 x 2 x 0,5 cm puis réassemblé dans une structure différente à l'aide d'une colle vinylique. Cette même expérience est faite sur du peuplier non comprimé et sur du peuplier comprimé. Pour chaque condition, 3 baguettes sont faites et testées sur un banc mécanique avec une analyse de la flexion 3 points. La vitesse est fixée à 10 mm/min. Comme il est possible de le constater sur la Fig. 4, la compression améliore nettement la flexibilité de la baguette.

Il est aussi possible de former des plaquettes de dimensions 160 x 60 x 5 mm selon ce même principe (Fig. 5).

Conclusion et perspectives

Les travaux de recherche menés ont permis d'obtenir plusieurs avancées sur l'utilisation de bois massif en lunetterie. L'utilisation de bois massif comprimé et réassemblé dans une autre configuration a aussi donné des résultats. Cependant, il reste encore des verrous à lever. C'est

un concept qui nécessite l'utilisation de beaucoup de colle pour arriver au rendu final. Cela se rapproche donc d'un contre-plaqué. De plus, en l'état la forme ne tient pas, une armature métallique serait donc nécessaire pour former des faces ou des branches avec ce nouvel assemblage bois.



Fig. 4 : Flexion maximum observée lors de l'analyse des baguettes de bois non compressé (à gauche) et compressé à 20% (à droite).

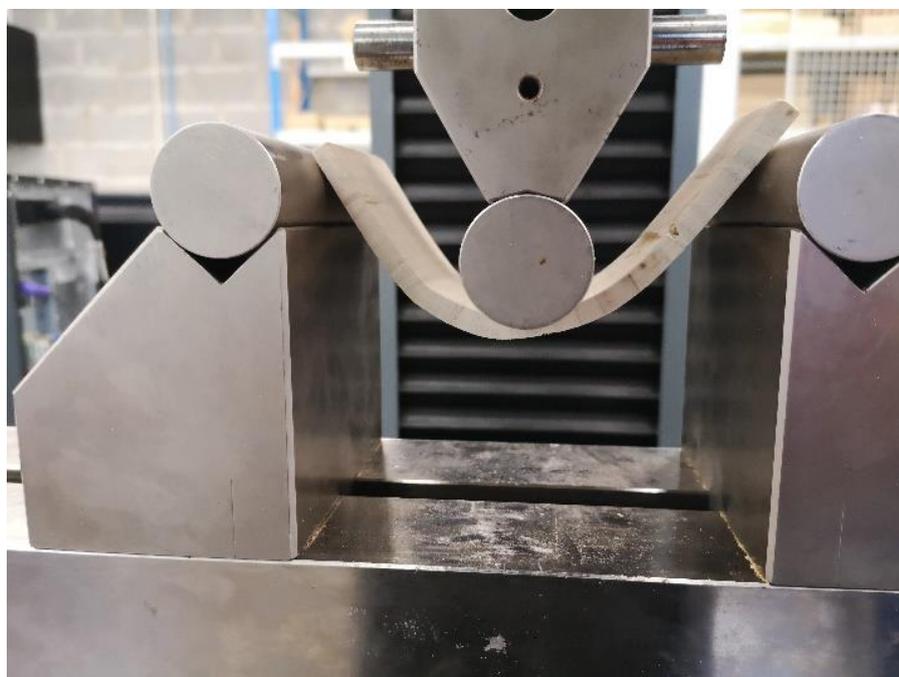


Fig. 5 : Déformation maximale observée de la face de peuplier compressé.

Remerciements

Le laboratoire de recherche LIMBHA de l'ESB remercie la Région Pays de la Loire pour l'accompagnement et le financement du projet ainsi que les deux partenaires industriels, MB Production et Bois Cintré du Bocage, qui ont permis de tester les hypothèses de travail à plus grande échelle.

Références

Blanchard P, Cheour-Eon M (2018) Conception et expérimentation d'un programme d'innovation collaborative pour les industries de la filière bois, 7^{èmes} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Cluny, 20-22 novembre 2018.

Irle M (2019) A review of methods to increase the flexibility of wood, Bull. Transilv. Univ. Braşov, Ser. II : Forestry, 12 (61), 53-62. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.2.4>.

Etude comparative du vieillissement du bois lamellé collé sous cycles accélérés et en conditions naturelles

GREFFIER Guilhem¹, ESPINOSA Luis¹, EYMA Florent¹, PERRIN Marianne¹

¹ Institut Clément Ader (ICA), CNRS UMR 5312, Université de Toulouse, IUT de Tarbes, UPS, France
guilhem.greffier@iut-tarbes.fr

Mots clefs : Durabilité ; Bois Lamellé Collé ; Ouvrages d'arts ; Mécanismes de rupture

Introduction

Aujourd'hui, l'utilisation du bois et particulièrement du lamellé collé (LC) comme alternative aux matériaux de constructions dits « traditionnels » tels que le béton et l'acier permet de diminuer l'impact environnemental de la construction d'ouvrages d'arts (Hill 2019, Hurmekoski 2017). Le bois LC est constitué de lamelles de bois aboutées et collées entre elles, permettant 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)

S'il existe des études sur le comportement à long terme du bois massif basées sur le modèle de la courbe de madison (Wood 1947) pour les classes d'emploi 1 ou 2 au sens de la norme EN 335 (AFNOR 2013) qui ont permis de définir les exigences des codes de calcul, 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 la présence de joints de colle.

Dans ce contexte, des essais accélérés ont été réalisés à l'Institut Clément Ader (Uwizeyimana 2021). Ces essais ont mis en évidence un affaiblissement des propriétés mécaniques en flexion du bois LC de l'ordre de 43.5% après 17 cycles d'humidification séchage (H/S) (Uwizeyimana et al. 2023). Ces résultats ont conduit à la réalisation d'essais en condition naturelle avec des éprouvettes instrumentées, chargées et non chargées, exposées en extérieur sur le site de l'IUT de Tarbes. L'objectif de ce travail est donc d'identifier l'impact des cycles H/S naturels combinés aux effets du chargement sur l'évolution des propriétés mécaniques du bois LC, et de les comparer aux résultats obtenus avec les cycles accélérés. Dans ce cadre, des essais en cisaillement sur les joints de colle et des essais de flexion statique sur les éprouvettes en bois LC ont été réalisés tous les 6 mois.

Matériel et méthodes

Vieillessement 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. Le Douglas a été l'essence choisie car elle fait partie des plus courantes dans l'industrie du lamellé collé pour une utilisation en structure extérieure.

Les éprouvettes mesurent 480mm 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 à 20° et 40% HR 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.

Essais de flexion

Pour chaque série d'essais ; 5 éprouvettes de chaque condition de vieillissement sont sélectionnées pour réaliser des essais en flexion 4 points (Fig. 1). Le dispositif d'essai est basé sur les recommandations de la norme NF EN 408 (AFNOR 2012).

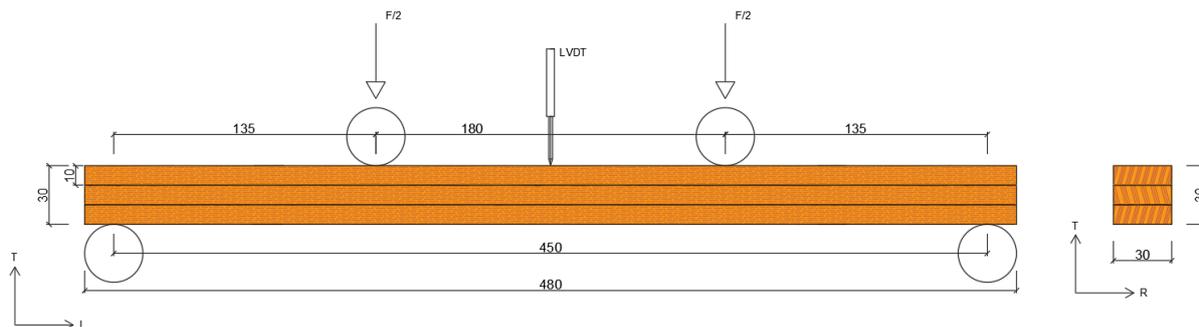


Fig. 1 : Dispositif d'essais en flexion 4 points

Les essais sont réalisés à l'aide d'une machine d'essai électromécanique MTS100 avec une cellule de chargement de 100 kN. La mesure de déformation au centre de l'éprouvette est réalisée par l'intermédiaire d'un capteur LVDT Solartron AX5S. Les essais mécaniques sont filmés par une caméra standard pour permettre une analyse à posteriori des mécanismes de rupture.

La contrainte maximale est déterminée d'après la norme NF EN 408 (AFNOR 2012)

Résultats

Evolution des propriétés mécaniques

Les essais mécaniques réalisés après les essais accélérés (Fig. 2) ont mis en évidence une diminution importante des propriétés mécaniques dès le premier cycles H/S, puis une diminution graduelle des propriétés entre les 7^{ème} et 13^{ème} cycles. Ensuite les propriétés ne diminuent plus jusqu'au 17^{ème} cycle (Uwizeyimana et al. 2023).

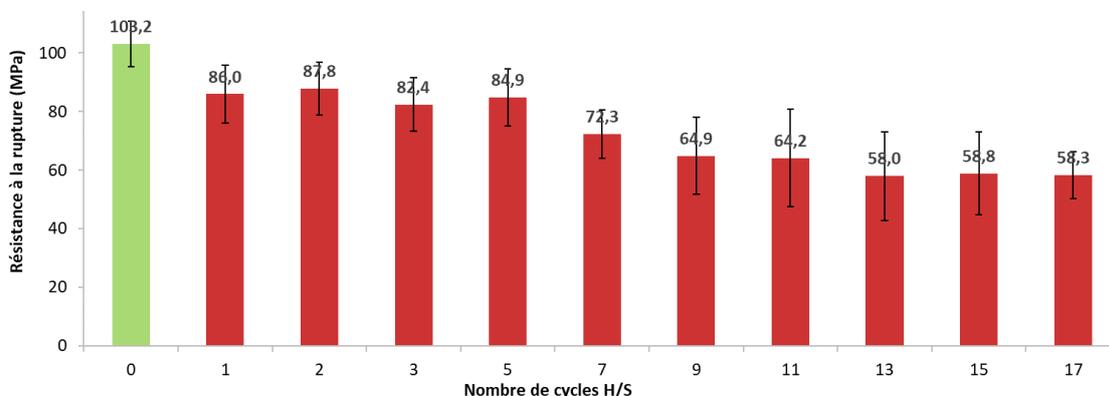


Fig. 2 : Evolution de la résistance à la rupture en fonction du nombre de cycle H/S (Uwizeyimana et al., 2023)

Lors des essais en conditions extérieures (Fig. 3), les propriétés mécaniques obtenues après 6 mois sont du même ordre de grandeur que celles obtenues après 1 cycle H/S accéléré.

Une tendance à la baisse des propriétés est observée pour les échantillons testés après 12 mois en extérieur avec une résistance moyenne proche de celle obtenue après le 7^{ème} cycle accéléré avec une diminution de l'ordre de 20% de la contrainte à la rupture en flexion.

Les écarts types entre les éprouvettes restent importants au regard des pertes de propriétés mesurées.

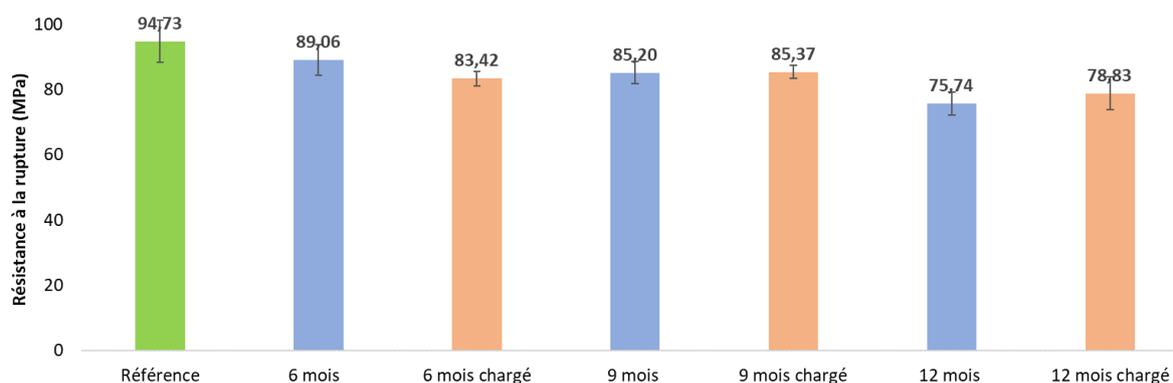


Fig. 3 : Evolution de la résistance à la rupture en fonction de la durée d'exposition en extérieur

Nous n'observons cependant pas de variance significative de résistance entre les éprouvettes chargées et non chargées.

Au-delà de la diminution des propriétés mécaniques, nous observons lors des essais de flexion une évolution des mécanismes de rupture.

Evolution des mécanismes de rupture

Lors des essais en flexion nous observons quatre principaux mécanismes de rupture (Fig. 4).

Le mécanisme de rupture de type A présente une courbe force déformation caractéristique avec plusieurs chutes de charge correspondant à des ruptures successives de cernes. Ce type de rupture est séquentiel avec la ruine de l'éprouvette qui intervient après la rupture de tous les cernes.

Le mécanisme de rupture de type B se caractérise par une rupture de l'éprouvette avec un éclatement de sa partie inférieure. Le mécanisme de rupture de type C se caractérise lui par une rupture de l'éprouvette avec une rupture nette perpendiculaire au fil du bois de la partie inférieure. Les ruptures de type B et C sont brutales, tous les cernes cassent de manière simultanée.

Le mécanisme de rupture de type D correspond à une rupture en cisaillement du joint de colle.

L'apparition des mécanismes de rupture en cisaillement s'explique par une diminution nette des propriétés en cisaillement des joints de colle des éprouvettes liés notamment à des délaminations qui ont pu être mesurées. Ce mécanisme de rupture n'a pas été détecté lors des essais sur des éprouvettes soumises à des cycles accélérés.

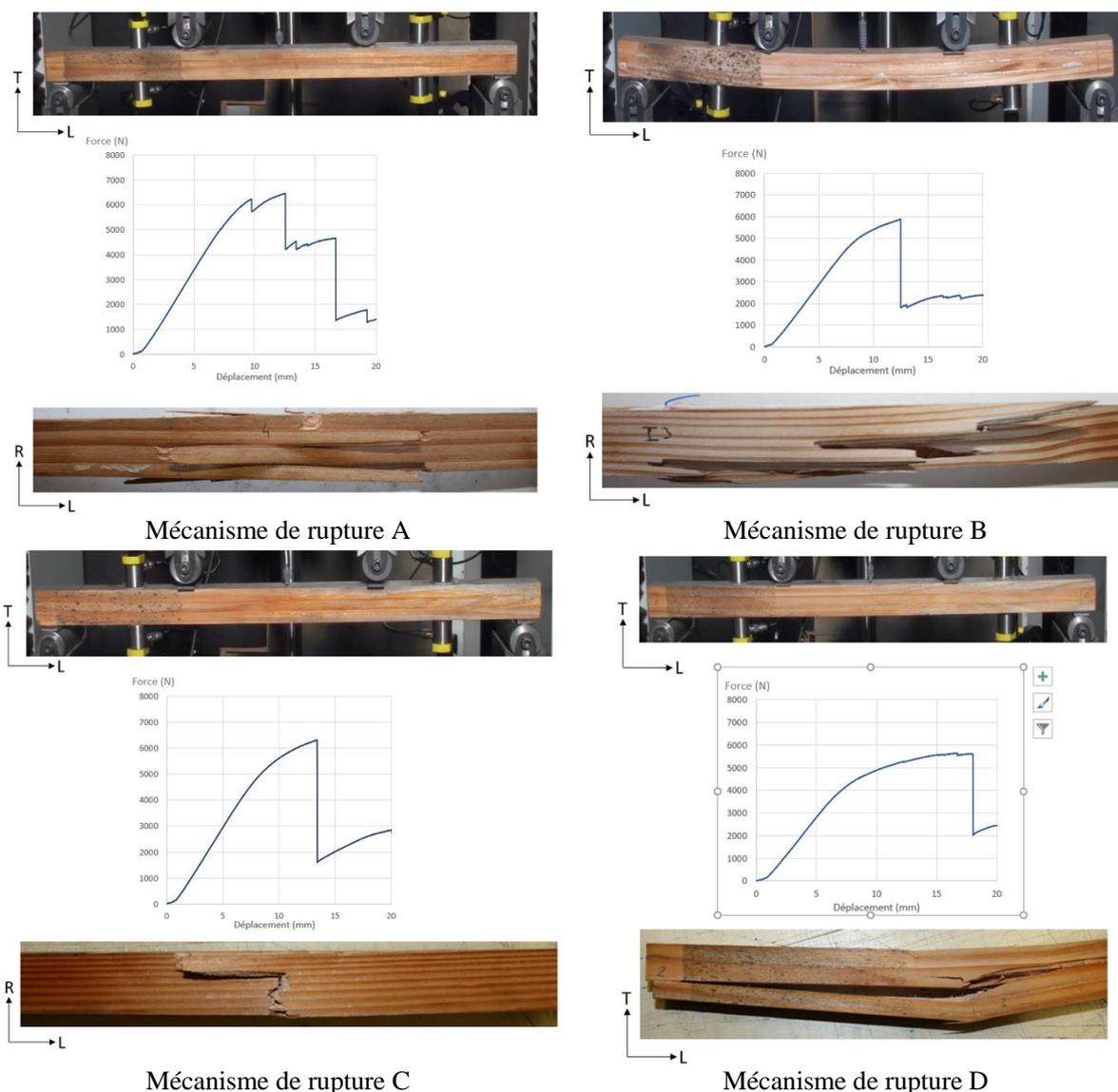


Fig. 4 Identification des différents mécanismes de rupture

Lors des essais il a été observé que les éprouvettes stockées à température et humidité constante ont tendance à rompre selon le mécanisme de rupture A, plus de 50% des éprouvettes pour les éprouvettes de référence des campagnes d'essais accélérés et 60 % pour les éprouvettes référence de la campagne d'essais en extérieur. Après vieillissement le comportement des éprouvettes tend vers des ruptures brutales de type B ou C. Après 17 cycles accélérés toutes les ruptures sont de type B ou C. Après 12 mois d'exposition en extérieur les ruptures de type A ne représentent plus que 20% de l'ensemble des ruptures. La proportion entre les ruptures B, C et D varie en fonction des séries d'essais. Nous n'observons pas d'effet significatifs du chargement sur les mécanismes de rupture.

Conclusion

Ces résultats permettent de conclure sur la sévérité des cycles accélérés, car le premier cycle H/S semble avoir un effet comparable à 6 mois d'exposition en extérieur. Cependant, concernant les essais en extérieur, compte tenu du faible nombre d'échantillons testés et des écarts types mesurés, il est difficile à ce jour de corréler l'évolution des propriétés mécaniques mesurées avec la durée d'exposition. Les résultats à plus long terme permettront de préciser les

tendances observées à ce jour. Ainsi, la pertinence des cycles accélérés pour simuler une exposition à long terme en extérieur pourra être évaluée.

Le taux de chargement des éprouvettes en conditions extérieures chargées semble trop faible pour avoir un effet significatif sur les propriétés mécaniques en flexion après seulement un an d'exposition en extérieur.

L'évolution des mécanismes de rupture semble indiquer une modification dans la structure du matériau qui favorise la propagation des fissures entre les cernes. Cependant, à ce stade, nous n'avons pas pu identifier avec certitude l'origine de la modification des mécanismes de rupture en fonction du vieillissement des éprouvettes.

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 en 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 335 : Durabilité du bois et des matériaux à base de bois — Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois.

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. In 8th International Network on Timber Engineering Research Meeting 54. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000506091>

Glulam Handbook (2018) Volume 1—Histoire et développement du bois lamellé. <https://handbook.glulam.org/volume-1-1-histoire-et-developpement-du-bois-lamelle-2/>

Hill CAS (2019) The Environmental Consequences Concerning the Use of Timber in the Built Environment. *Frontiers in Built Environment*, Volume 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2019.00129>

Hurmekoski, E. (2017) Comment la construction en bois peut-elle contribuer à réduire la dégradation de l'environnement ? European Forest Institute, ISBN 978-952-5980-34-9.

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>

Uwizeyimana P (2021) Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs, thèse de l'Université Toulouse III.. <http://thesesups.ups-tlse.fr/4906/>

Uwizeyimana, P., Perrin, M., Laügt, E., Larricq, P., & Eyma, F. (2023). Strain measurement in glulam timber for bridges with embedded strain gauges and detection of moisture-variation effects. *Wood Material Science & Engineering*, 0(0), 1-11.

<https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2165147>

Wood L.W. (1947). Behavior of wood under continued loading. US Department of Agriculture, Forest Service.

Modélisation de l'hétérogénéité des contraintes dans les lamelles aboutées panneautées de chêne :

SOH MBOU Delin¹, BESSEAU Benoît², POT Guillaume¹, VIGUIER Joffrey¹,
ROLLE Jecolia¹, MILHE Louis¹

¹Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM Université,
F-71250 Cluny, France

² Ducerf Groupe, Le Bourg, 71120 Vendenesse-lès-Charolles, France
Delin.SOH_MBOU@ensam.eu

Mots clés : Sciage ; chêne ; aboutage ; panneautage ; courçons.

Contexte et objectifs

Cadre général

La France est la quatrième nation forestière de l'Union européenne en superficie, et présente la spécificité de contenir 64 % de feuillus (en volume sur pied). Si la ressource en bois résineux et celle en feuillus de première qualité sont bien exploitées, une partie de la forêt est sous-exploitée et est qualifiée de qualité secondaire.

Ces travaux de stage s'inscrivent dans le cadre du projet Transformation et Classement éco-Efficients des Qualités Secondaires de chêne pour leur valorisation en bois d'œuvre (TreCEffiQuaS) financé par l'ADEME et en collaboration avec FCBA et le groupe DUCERF.

Ce projet a pour objectif de proposer des solutions permettant de mieux valoriser les bois feuillus de basse qualité dits de qualité secondaire en maximisant leur transformation en bois d'œuvre (BO) pour la construction d'habitations à haute efficacité énergétique. L'industrie du résineux connaît une grande avance dans le domaine de la construction à la fois pour des raisons historiques et du fait de son caractère plus homogène que le feuillu.

Le but de ce travail est de pouvoir fabriquer des bois collés de lamelles aboutées-panneautées en utilisant du chêne de faible largeur et donc de faible coût économique. La problématique est relative à l'impact de la plus grande hétérogénéité des lamelles de bois feuillus sur leurs propriétés structurelles.

Cadre mécanique

Il est question ici de faire une évaluation mécanique statique des lamelles aboutées-panneautées de feuillus en traction en considérant uniquement le comportement élastique de la lamelle. Les courçons utilisés sont supposés homogènes (seuls leurs modules d'élasticité moyens sont considérés) et l'hétérogénéité est considérée à l'échelle de la lamelle de par la variabilité des propriétés d'un courçon à un autre.

Matériel et Méthode

Echantillonnage et mesures non-destructives

Pour un lot de 365 courçons, le module dynamique en traction-compression Edyn a été mesuré par mesures vibratoires avec la machine BING « Beam Identification by Non-Destructive testing » développée par le CIRAD (Brancheriau et al. 2007). Les modes propres de chaque courçon sont sollicités suite à une excitation longitudinale ou transversale. Les fréquences propres sont alors obtenues par analyse de ce signal par transformée de Fourier. La première

fréquence propre en traction-compression a été utilisée pour obtenir le module d'élasticité dans le sens longitudinal EL.

Les autres propriétés mécaniques du chêne utilisé ici sont calculé à 12 % d'humidité comme la moyenne des rapports orthotropes de Kretschmann (2010) présentés dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Propriétés mécaniques du chêne selon Kretschmann (2010).

| E_L (GPa) | E_R (GPa) | E_T (GPa) | G_{LR} (GPa) | G_{LT} (GPa) | G_{RT} (GPa) | ν_{LR} | ν_{LT} | ν_{RT} |
|-------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|
| 14.0 | 2.28 | 1.01 | 1.2 | 1.1 | 0.63 | 0.37 | 0.43 | 0.3 |
| $K_1=1$ | $K_2 = \frac{E_R}{E_L}$ | $K_3 = \frac{E_T}{E_L}$ | $K_4 = \frac{G_{LR}}{E_L}$ | $K_5 = \frac{G_{LT}}{E_L}$ | $K_6 = \frac{G_{RT}}{E_L}$ | $K_7=1$ | $K_8=1$ | $K_9=1$ |

Le Tab. 2 présente le calcul des propriétés mécaniques de chaque courçon à partir de leurs modules d'élasticité longitudinaux et des rapports orthotropes de Kretschmann (2010).

Tab. 2 : Propriétés mécaniques des courçons utilisés dans le modèle EF.

| E_L (GPa) | E_R (GPa) | E_T (GPa) | G_{LR} (GPa) | G_{LT} (GPa) | G_{RT} (GPa) | ν_{LR} | ν_{LT} | ν_{RT} |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|------------|------------|
| E_{dyn} mesuré | $E_{dyn} \times K_2$ | $E_{dyn} \times K_3$ | $E_{dyn} \times K_4$ | $E_{dyn} \times K_5$ | $E_{dyn} \times K_6$ | 0.37 | 0.43 | 0.3 |

Trois scénarios ont été testés pour quantifier l'impact de la variabilité des propriétés : le scénario du lot de courçon pris en entier sans tri ([7500 ; 19000] MPa), le tri des courçons de faibles modules ([7500 ; 11500] MPa), le tri des courçons de forts modules ([11500 ; 19000] MPa) (Fig. 1).

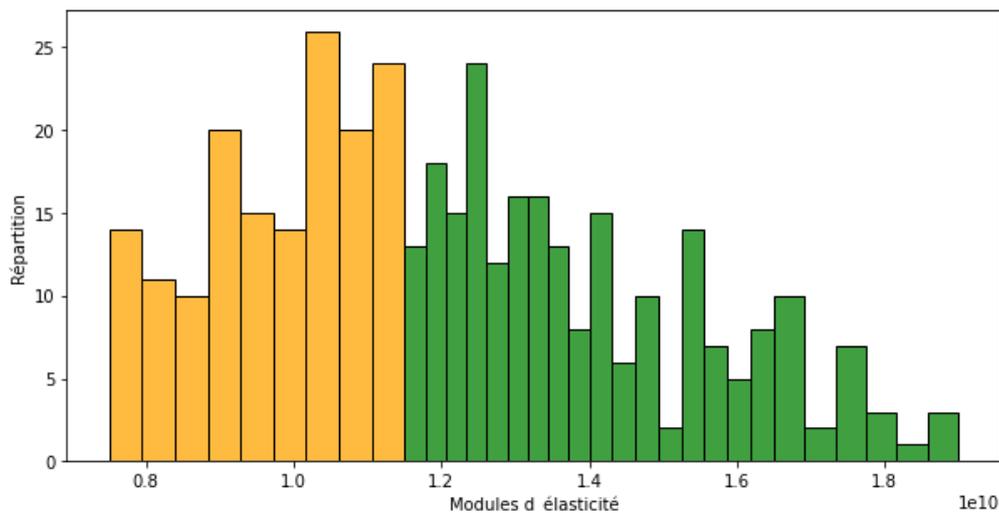


Fig. 1 : Sous-lots de modules retenus en Pa

Modèle éléments finis

Il a été développé au cours de ces travaux un script Abaqus-Python permettant de constituer des lamelles aboutées et panneautées hétérogènes (Fig. 2) et de les tester en élasticité linéaire. Bien qu'une modélisation en 2D soit possible, l'intérêt a été porté sur une modélisation en 3D pour préparer une possible future version du modèle qui tiendrait compte de l'hétérogénéité à l'intérieur des courçons notamment en prenant en compte l'orientation des fibres en 3D. Dans le modèle éléments-finis, 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 préféré. Pour le module d'élasticité transverse, la moyenne entre les modules tangentiel et radial a été retenue.

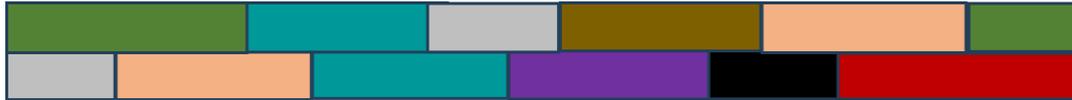


Fig. 2 : Lamelle hétérogène en 2D

Les données d'entrée du code sont la géométrie de chacun des courçons choisis aléatoirement dans le lot (les courçons sont de même largeur et de même épaisseur et ne diffèrent du point de vue géométrique que sur la longueur) ainsi que leurs propriétés mécaniques (masse volumique et modules élastiques moyens). Les courçons sont ensuite assemblés dans le sens de la longueur jusqu'à atteindre la longueur fixée pour obtenir une lamelle aboutée. L'opération est répétée pour la seconde lamelle et les 2 lamelles sont enfin assemblées sur chant dans le sens de la largeur cette fois ci pour obtenir une lamelle aboutée-panneautée. Un essai de traction est enfin simulé.

Des éléments solides quadratiques (hexaédriques) à 20 nœuds (C3D20) ont été utilisés pour le maillage.

Résultats et Discussions

La Fig. 3 donne un exemple d'état de contraintes S_{xx} suivant la direction x pour une lamelle panneautée.

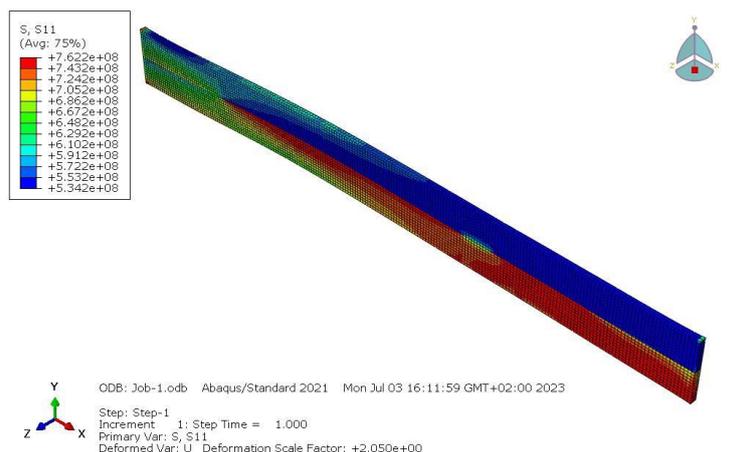


Fig. 3 : Exemple d'un état des contraintes pour 2 lamelles aboutées et panneautées

La répartition non uniforme de la distribution des contraintes dans la largeur de la lamelle panneautée peut s'expliquer par la variabilité des modules élastiques des deux lamelles aboutées la constituant, agissant ainsi comme deux ressorts en parallèle de raideur différentes. Par ailleurs, la variation des contraintes au sein même des courçons est causée par de la flexion induite du fait de la variabilité de module dans la largeur.

Les valeurs de contraintes observées n'ont quantitativement pas d'intérêt mais permettent de remarquer une hétérogénéité. Étant en élasticité linéaire, il est intéressant de quantifier cette irrégularité d'état de contraintes en évaluant le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte moyenne (car l'ingénieur pour dimensionner une structure, la considère homogène) dans chaque lamelle nommée ici sur-contrainte $R = \sigma_{\text{maximale}} / \sigma_{\text{moyenne}}$. Cette sur-contrainte est un indicateur de la distribution des contraintes et est utilisée ici comme un critère de performance de la lamelle : un rapport élevé manifeste une distribution non uniforme des contraintes dans la lamelle ou une susceptibilité à la rupture dans les zones de contraintes élevées alors qu'un rapport faible manifeste une répartition plutôt homogène des contraintes dans toute la lamelle. La contrainte moyenne représente la contrainte qu'aurait eu la lamelle si elle était homogène.

Afin d'obtenir un résultat statistiquement représentatif, pour chaque sous-lot il a été choisi aléatoirement des courçons afin de constituer 1000 lamelles virtuelles comme cela se ferait en industrie. La Fig. 4 montre la distribution des sur-contraintes dans les différents sous-lots.

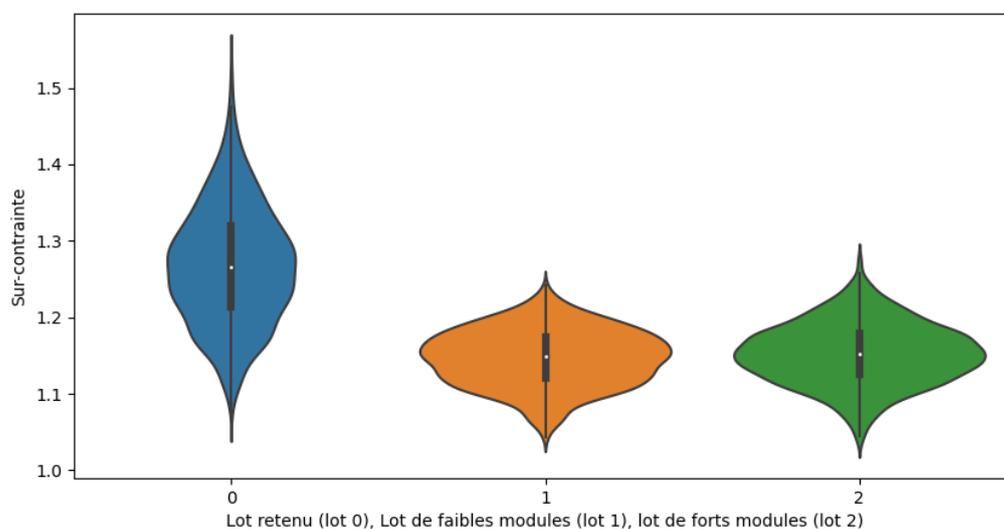


Fig. 4 : Distribution des sur-contraintes des lamelles

Le lot entier de modules pris sans tri (lot 0) donne des sur-contraintes beaucoup plus élevées que les lots de faibles modules (lot 1) et de forts modules (lot 2). La division du lot entier permet de réduire la dispersion des propriétés du lot et permet d'avoir au fractile à 95 %, une sur-contrainte de : 1.20 soit 20 % pour le sous-lot 1 (modules faibles), 1.22 soit 22 % pour le sous-lot 2 (modules forts) contre 1.40 soit 40 % pour le lot pris en entier. Pour 95% de la population, resserrer la variabilité des propriétés des courçons favorise une réduction des sur-contraintes de 20 %.

Conclusions et perspectives

Les lamelles aboutées panneautées en chêne génèrent une hétérogénéité des contraintes. La réduction de la dispersion entre les propriétés mécaniques des courçons par un tri permet néanmoins de réduire les sur-contraintes de moitié. Afin d'améliorer le modèle EF, l'hétérogénéité de chaque courçon pourra être prise en compte par considération de leurs orientations de fibres. Une validation par expérimentation est également envisagée.

Remerciements

Ce projet est soutenu financièrement par l'ADEME au travers du projet de recherche TreCEffiQuaS (appel à projet ADEME Graine).

Références

Besseau B. (2021) Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne, thèse de doctoract, Paris HESSAM, <https://www.theses.fr/2021HESAE056>.

Brancheriau L., Paradis, Sébastien, Baillères H. (2007). Bing: Beam identification by non destructive grading, Cirad, <http://ur-biwooeb.cirad.fr/en/products/bing/what-is-it>.

Kretschmann D. (2010) Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood.

Sur le comportement au choc du bois

MAIGRE Hubert¹, CREIGHTON Cian², GRUAZ Luce², LABOUYRIE DUARTE Amaya²

¹Univ Lyon, CNRS, INSA Lyon, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

²Univ Lyon, INSA Lyon, Dept GM, 69621 Villeurbanne, France

hubert.maigre@insa-lyon.fr

Mots clés : choc ; impact ; épicea ; liège

Contexte et objectifs

Le matériau bois sous toute ses formes (massif, reconstitué, sec, vert, ...) peut se retrouver en situation de subir des chocs à grande vitesse notamment quand il est utilisé comme matériau de protection. Cela peut être des emballages ou même des futaies susceptibles d'arrêter des rochers. L'intérêt de l'utilisation du bois est sa faible densité (gain de poids possible) et son caractère renouvelable.

L'étude qui suit a consisté à examiner deux situations particulières :

- La première est celle de l'utilisation de plaques de liège comme protection pareballe.
- La seconde s'intéresse aux capacités l'absorption de choc dans les sens transverse d'épicéa selon différentes conditions (sec, humide, gelé)

Dispositif expérimental

Le banc d'essai est un tube lanceur de projectile à air comprimé (Fig. 1). Le projectile est une bille de céramique de roulement à bille enchâssée dans un sabot qui est arrêté juste avant l'impact. L'impact est filmé par une caméra ultra rapide cadencée à 50 000 i/s ce qui permet d'obtenir la vitesse incidente de la bille, sa vitesse de rebond ou de perforation.

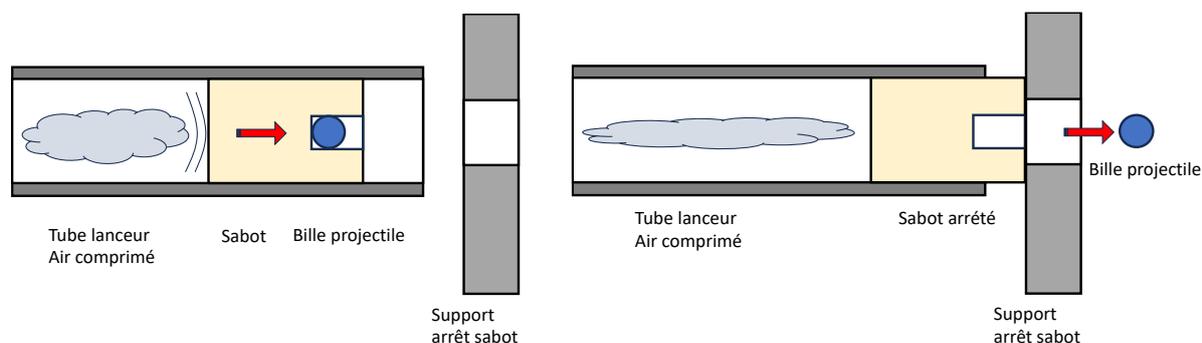


Fig. 1 : Dispositif de lancement, accélération avec le sabot puis arrêt du sabot et vol libre de la bille

Tab. 1 : propriétés mécaniques de la bille projectile

| Matériau | Masse [g] | Diamètre [mm] | Vitesse [m/s] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|
| céramique | 2,3 | 11,1 | 30 à 60 |

Perforation de liège

Dans ces essais, la cible est une ou plusieurs plaques de liège de 3 mm d'épaisseur maintenues entre deux supports rigides en acier présentant une ouverture de 50 mm de diamètre dans laquelle la bille va pénétrer et traverser le liège (Fig. 2).



Fig 2.: Schéma et vue arrière des plaques de liège soumises à l'impact de bille

A l'aide de la caméra, on évalue la vitesse incidente puis la vitesse de sortie ce qui permet de définir une énergie dissipée durant la perforation (Fig. 3).

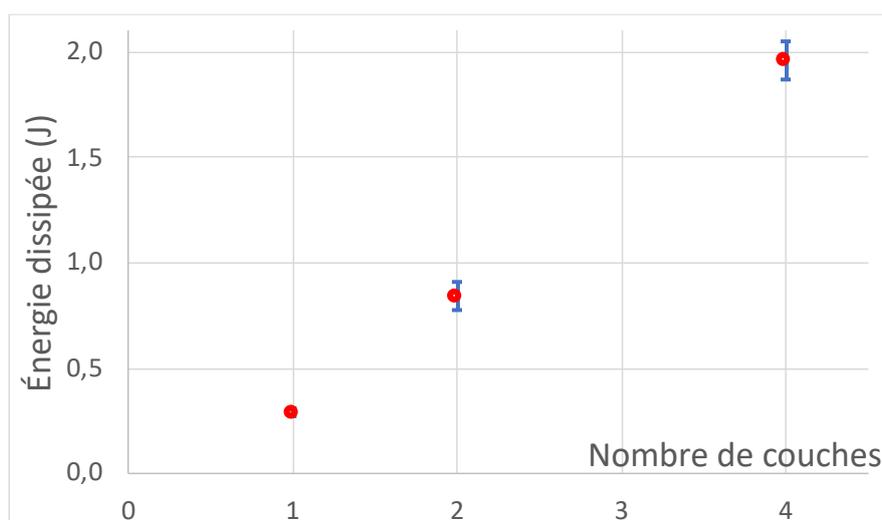


Fig. 3 : Energie dissipée en fonction du nombre de couche

Le nombre d'essais réalisés ayant été très limités (6 au total) ces premiers résultats demandent à être complétés.

Impacts sur épicéa

Cette fois, les échantillons à tester sont des cubes d'épicéa de 35 ± 1 mm de côtés placés en appui sur une barre en aluminium de 50 mm de diamètre instrumentée. Pour tous les échantillons, la direction d'impact est orthogonale à la direction longitudinale du bois (Fig. 4).

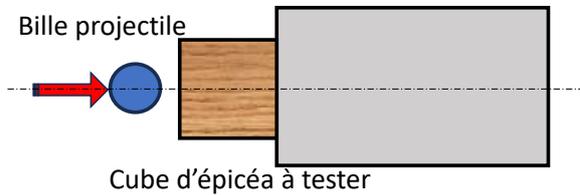


Fig. 4 : Mise en place d'un cube d'épicéa avant impact par la bille.

Dans ces essais il s'agit alors de mesurer la vitesse de rebond pour la comparer à la vitesse incidente (Fig. 5). On notera aussi après les essais la dimension et la profondeur des marques laissées par la bille. Il était aussi prévu de mesurer l'effort d'impact transmis par l'échantillon d'épicéa à la barre d'appui, malheureusement cet effort est trop faible pour être extrait des bruits de mesure.

Les échantillons (18 au total) sont répartis en 3 lots :

- Echantillons naturellement secs à température ambiante
- Echantillons saturés d'eau par trempage à température ambiante
- Echantillons saturés d'eau à température ambiante puis placés dans un congélateur à -15°C et testés sitôt sortis du congélateur.

L'intérêt de geler des échantillons est de pouvoir refléter ce qui se passe pour des emballages de protection de colis à très basse température. L'autre intérêt est d'examiner l'effet de l'eau dans les cellules de bois soit à l'état liquide soit à l'état solide.

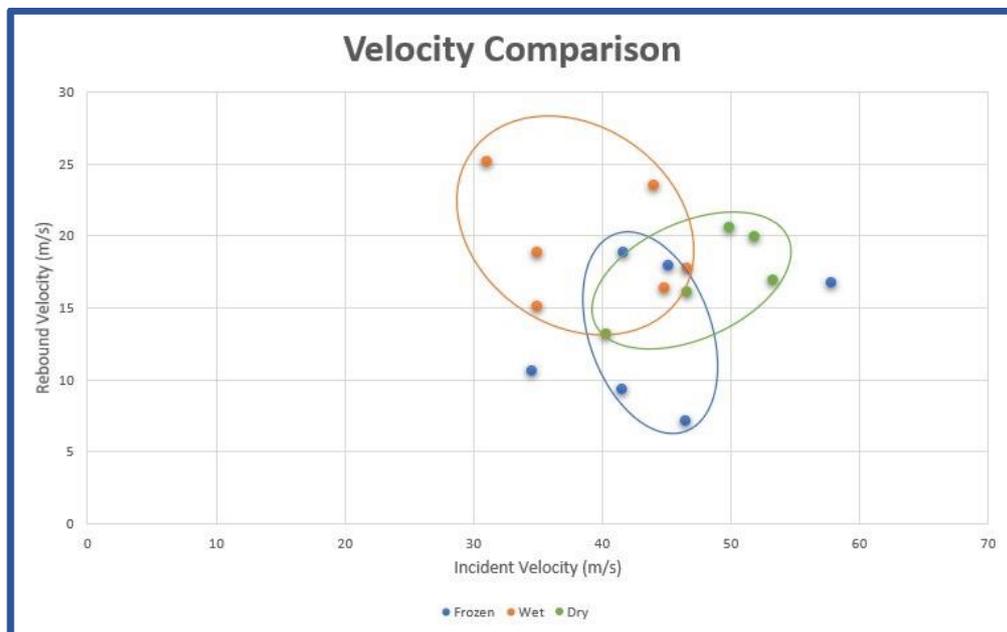


Fig. 5 : Relation entre vitesse incidente et vitesse de rebond selon les conditions hydriques

Ces premiers résultats montrent déjà une grande dispersion. Celle-ci est due en partie par l'incidence de la bille qui n'impacte pas systématiquement le bois dans l'axe. Cela est peut-être aussi dû à la direction transverse impactée qui n'est pas identifiée (radiale ou tangentielle).

Cependant on remarque que les échantillons gelés sont ceux pour lesquels le rebond est le plus faible mais cette information seule ne suffit pas à qualifier la bonne absorption du choc.

Un autre indicateur intéressant est la taille de la marque laissée après impact (Fig. 6).

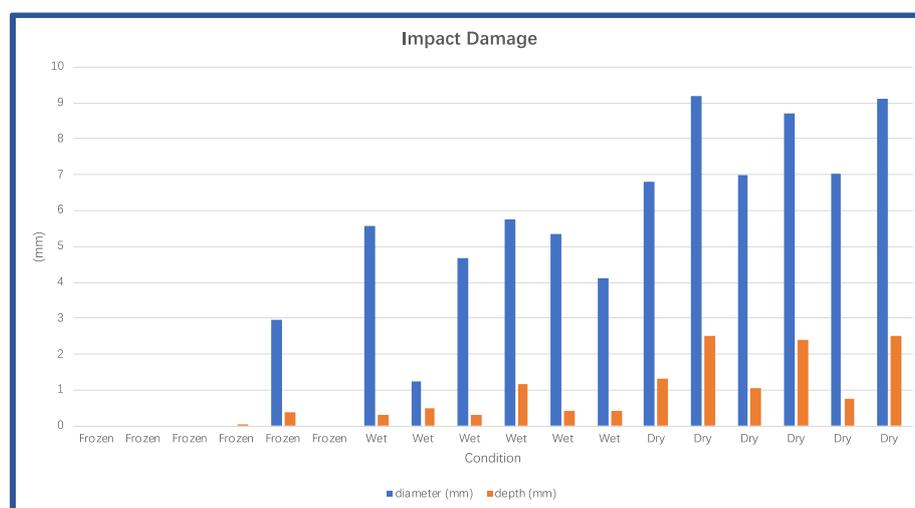


Fig. 6 : Marques laissées après impact (diamètre et profondeur)

Il apparaît clairement que les échantillons saturés d'eau subissent moins de dommages macroscopiques et encore moins lorsqu'ils sont gelés. Cela s'explique sûrement par le remplissage des cellules du bois par l'eau ce qui limite leur effondrement lors d'un impact transverse. Il est néanmoins difficile de savoir si ces phénomènes sont dus à la présence supplémentaire de matière (l'eau à l'état liquide ou solide en l'occurrence) ou aux changements de propriétés mécaniques du bois avec l'humidité et la température.

Conclusions et perspectives

Nous avons montré que l'on pouvait caractériser le bois et ses dérivés vis-à-vis de son comportement à l'impact. Cette caractérisation doit être adaptée aux spécificités du bois comme son anisotropie et sa sensibilité importante à l'humidité. Afin d'affiner les résultats déjà obtenus il est important de réaliser plus d'essais avec une plus large gamme d'impact et en distinguant plus précisément la direction radiale de la direction circonférentielle. De plus une modification du banc d'essai est prévue pour pouvoir mesurer les efforts transmis pas les échantillons impactés afin de mieux quantifier les effets d'absorption - dispersion (étalement du choc dans le temps) du bois vis-à-vis du choc.

Références

- Gupta Y.M., Shukla, A. (2012) Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing, and applications, *Exp. Tech.*, 36, 19–28
- Baumann G., Brandner R., Müller U., Stadlmann A., Feist F. (2021) A comparative study on the temperature effect of solid birch wood and solid beech wood under impact, *Loading. Materials*, 14, 7616. <https://doi.org/10.3390/ma14247616>
- Tippner J., Milch J., Sebera V., Brabec M. (2022) Elasto-plastic material model of oak at two moisture content levels, *Holzforschung*, 76, 886–896.
- Müller U., Jost T., Kurzböck C. et al. (2020) Crash simulation of wood and composite wood for future automotive engineering, *Wood Mater. Sci. Eng.*, 15, 312–324.

Types, quantities and heavy metal content of the finishes on fibreboard waste

LEBRETON Flore¹, LAGARDE Hélène¹, IRLE Mark¹, KUTTER Marie¹,
BELLONCLE Christophe¹, Julia BUCHNER²

¹Laboratoire Innovation Matériau Bois HABitat (LIMBHA), École Supérieure du Bois (ESB)

²Plant Development & Electron Microscopy, Biocenter LMU Munich, Planegg-Martinsried
flore.lebreton@esb-campus.fr

Key words: recovered wood; recycling; MDF; coating; X-ray fluorescence (XRF); secondary raw material

Context and objectives

Fibreboard is one of the main types of wood-based panels. EN 316 give a definition of a fibreboard: “panel material with a nominal thickness of 1.5mm or greater, manufactured from lignocellulosic fibres with application of heat and/or pressure” (AFNOR 2009).

Medium Density Fibreboard (MDF) is the second most produced wood-based panel in the world and global production capacity continues to increase (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture 2022). As products made with MDF have an average lifespan of 14 years (Irle et al. 2019), they are rapidly converted to waste. This phenomenon leads fibreboard residues to be an increasingly important part of the recovered wood stream. Moreover, this flux is not easily incorporated as a secondary raw material for particleboard. Indeed, too much fibreboard residues in the mix leads to lower mechanical properties of particleboards (Lee et al. 2022). EcoReFibre, project funded by the European Union, proposes the creation of a sorting machine to separate fibreboard residues from the wood waste. These ones are various: from different types of fibreboards, sizes, without or with coating on the top... This last category is interesting to analyse as it can be expected to be more difficult to recycle due to possible chemical contamination. It is therefore important to characterize this fraction in order help imagine efficient recycling methods for this material.

Material and methods

A collection of wood waste is carried out in France since July 2022 as part of EcoReFibre project. The material is first sieved to keep only the largest particles: the ones retained in an 8 mm mesh as they represent the biggest part of the sample and are easily recognisable and distinguishable. These particles are picked by hand into 4 categories: solid wood (“SW”), panels such as Plywood-OSB-Particleboard (“POP”), non-wood (“NW”) and fibreboard (“FB”).

The fibreboard fraction is set aside and labelled according to its origin. Every fraction is then sort according to 4 different types of coating (Fig. 1) as they might have different compositions.

As the purpose of the study is to evaluate the pieces with a view to their recycling, an X-ray fluorescence (XRF) spectrometer is used to detect elements on the surface of the coating. Each pile sampled is represented by 3 bags in average. For each bag, a piece of each sub-category is taken and put under the XRF machine. It is possible that not all four categories of finish are represented in the bag. An acquisition time of 60 s was used for the XRF measurements. The specimen was moved after each measurement so that 5 measurements covered the entire surface of the finish.

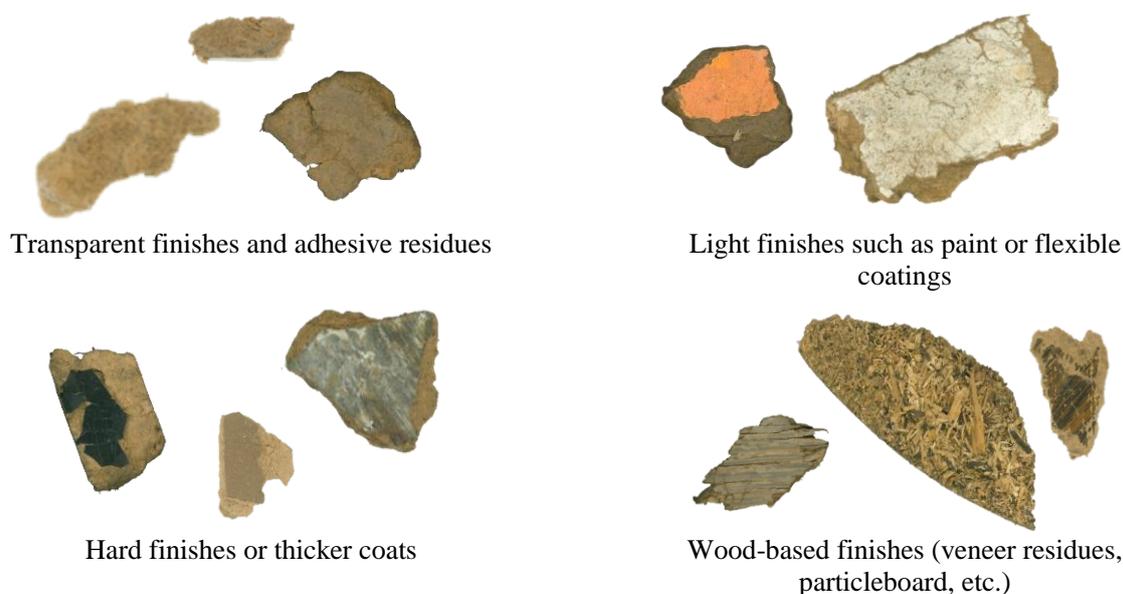


Fig. 1: The 4 different categories of finishes

The chemical analysis is performed, based on elements assessed by the European Panel Federation. The document “EPF standard for delivery conditions of recycled wood” (EPF 2002) gives limit values concerning the chemical contamination (Tab. 1).

Tab 1: Limit contamination values for recycled wood (EPF standard)

| Elements | Limits values (mg/kg recycled wood) |
|---------------|-------------------------------------|
| Arsenic (As) | 25 |
| Cadmium (Cd) | 50 |
| Chromium (Cr) | 25 |
| Copper (Cu) | 40 |
| Lead (Pb) | 90 |
| Mercury (Hg) | 25 |
| Chlorine (Cl) | 1000 |
| Fluorine (F)* | 100 |

* Not detectable by the XRF device

Results

A poster will include the first results of this study.

Acknowledgement

The author is grateful to the many collaborators involved in the various research projects on wood recycling. 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.
EPF (2002) EPF standard for delivery conditions of recycled wood .

Irle M., Privat F., Couret L., Belloncle C., Déroubaix G., Bonnin E., Cathala B. (2019) Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF. *Wood Material Science and Engineering* 14(1):19-23. doi: 10.1080/17480272.2018.1427144.

Lee S.H., Lum W.C., Boon J.G., Kristak L., Antov P., Pędzik M., Rogoziński T., Taghiyari H.R., Rahandi Lubis M.A., Fatriasari W., Yadav S.M., Chotikhun A., Pizzi A. (2022) Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. *Journal of Materials Research and Technology* 20:4630-58. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.166.

Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (2022) FAOSTAT. FAOSTAT.

Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques de placages d'hêtre

DEMOULIN Leyne¹, POT Guillaume¹, DENAUD Louis¹, GIRARDON Stéphane¹,
MARCON Bertrand¹

¹Arts et metier institute of technology, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté,
HESAM Université, F-71250, Cluny, France
leyne.demoulin@ensam.eu

Mots clefs : Bois sans défaut ; Caractérisation mécanique ; Stéréo-corrélation d'images ; Caractérisation non destructive

Contexte et objectifs

L'industrie du transport souhaite réduire son empreinte carbone vis-à-vis de tous les problèmes engendrés par les gaz à effet de serre. Pour atteindre ce but, des matériaux hautes performances fabriqués en bois pourraient être utilisés pour des applications structurales. C'est dans cette logique que le projet WOOFHI (Wood/natural Fiber High homogeneity / performance composite) a pris naissance pour fabriquer des matériaux composites homogènes et optimisés faits à base de matériaux hétérogènes et variables. Cette application nécessite de savoir trier le matériau bois en fonction de ses propriétés mécaniques en se basant sur des méthodes de mesure non destructives et quantitatives. Le tri visuel est standardisé mais n'est pas très efficace et les propriétés mécaniques après tri ne sont pas optimales (Faydi 2017, Duriot 2021). Plusieurs études essaient de prédire le module élastique et la résistance mécanique de produits bois structuraux avec précision et fiabilité comme le montrent (LVL Handbook Europe 2019) en utilisant l'orientation des fibres et la masse volumique locale mesurée sur le bois (Viguier et al. 2018). Le coefficient de détermination obtenu est inférieur à 0.7 et peu d'études prédictives concernant les placages et les échantillons de petites tailles sans défaut ont été faites (Pramreiter et al. 2021, Cha 2003).

L'objectif de ce travail est de comprendre le comportement mécanique du bois sans défaut et comment des perturbations locales influent sur le comportement du matériau. Un protocole expérimental sur des petites éprouvettes réalisées à base de placages visuellement « sans défaut » a été mis en place. Des mesures non destructives d'orientation des fibres et de masse volumique ont d'abord été réalisées, puis les éprouvettes ont été sollicitées jusqu'à rupture par un essai de traction.

Matériel et méthode

Protocole expérimental

La première étape du protocole concerne la fabrication des placages qui proviennent du procédé de déroulage. L'essence étudiée est le hêtre (*fagus sylvatica*) qui provient de la région Centre Val de Loire. Dans un second temps, des éprouvettes de dimension 350 mm de long, 20 mm de large et 2 mm d'épaisseur ont été fabriquées à partir de ces placages à l'aide d'une machine de découpe laser. Les éprouvettes ont été stockées à une température de 24°C avec une humidité relative de l'air de 50% afin de les stabiliser à une humidité de 10 %. Les échantillons ont été découpés avec des angles relatifs à une direction supposée être à 0° pour créer volontairement une variabilité au sein de l'orientation des fibres (Fig. 1). Cette distribution est présentée dans

le Tab. 1. Près de 40 placages ont été nécessaires afin de produire 450 éprouvettes. Une seule orientation a été utilisée par placage.

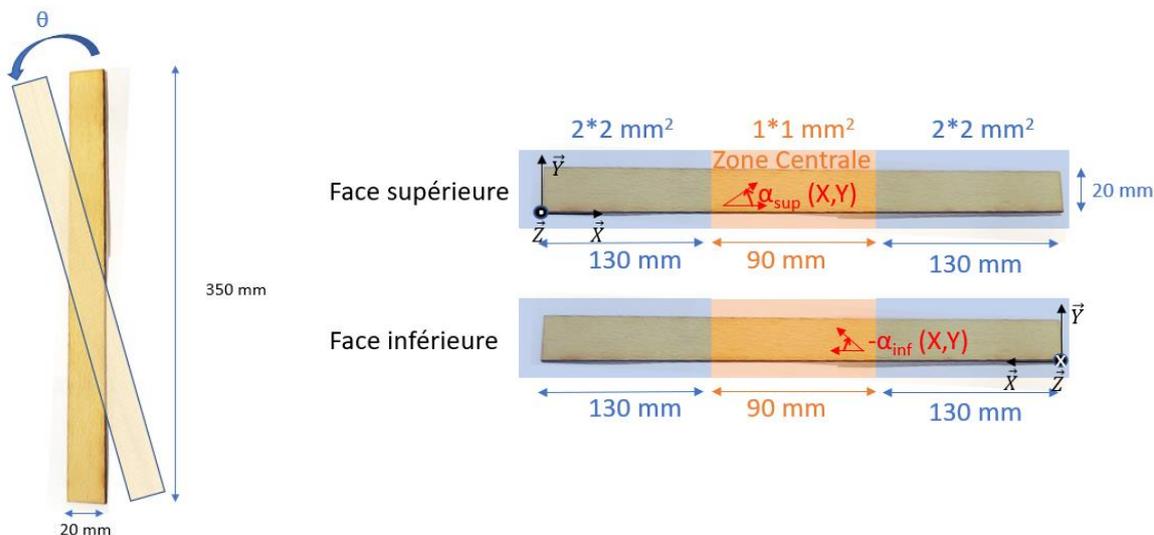


Fig. 1 : Angle de découpe Fig. 2 : Résolution des mesures laser pour la face supérieure et inférieure

Ensuite, les échantillons sont scannés avec une machine à commande numérique munie d'une caméra et d'un pointeur laser qui va balayer toute leur surface. Cette technologie utilise l'effet trachéide (Nyström 2003, Simonaho et al. 2002). Cet effet consiste à projeter un laser circulaire sur une surface plane de bois. La diffusion de la lumière étant plus élevée dans le sens de la fibre du bois, une ellipse lumineuse dont le grand axe suit cette orientation se forme alors. Les faces supérieure et inférieure de l'échantillon sont scannées avec différentes résolutions (Fig. 2) afin d'obtenir des cartographies des angles (Fig. 3a,c). La zone centrale est plus résolue que les extrémités car c'est la zone d'intérêt visible entre les mors de traction. L'étape suivante consiste à scanner les éprouvettes à l'aide d'un scanner classique pour obtenir une image d'une résolution de 400 Dpi. La Fig. 3. montre la superposition de la cartographie des angles obtenues avec le scan (Fig. 3b,d).

La largeur est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse et l'épaisseur à l'aide d'un micromètre extérieur. Les échantillons sont ensuite pesés à l'aide d'une balance. Ces mesures permettent de calculer la masse volumique apparente. L'essai de traction a pour but de déterminer les propriétés mécaniques locales grâce à une machine d'essai universelle ZWICK-Roell (250 kN). Les déplacements ont été mesurés par stéréo-corrélation d'images avec la technologie développée par LaVision. Une précharge de 0.1 MPa est appliquée avant essai. Les vitesses de déplacement imposées sur les éprouvettes sont décrites dans le Tab. 1. Les vitesses sont réglées afin d'obtenir un temps d'essai compris entre 100 et 180 s jusqu'à la rupture.

Tab. 1 : Répartition des éprouvettes en fonction de l'angle de découpe et la vitesse d'essai

| Angle de découpe (°) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 |
|--|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| Nombre | 110 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 30 |
| Échantillons testés | 40 | 16 | 15 | 11 | 24 | 14 | 9 |
| Vitesse de déplacement imposé (mm/min) | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 |

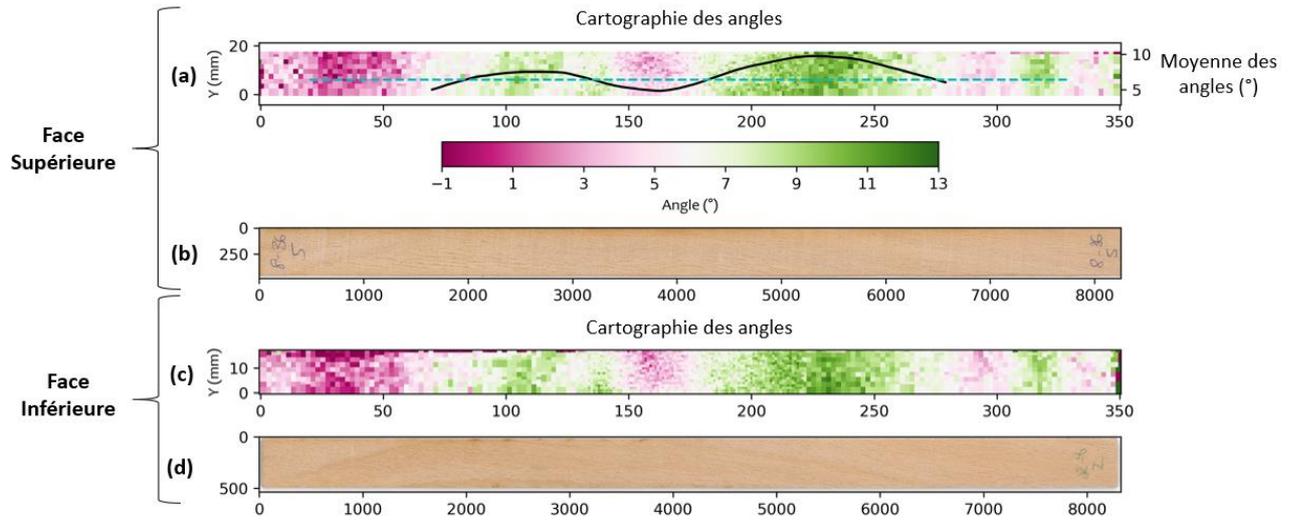


Fig. 3 : (a) Cartographie des angles de la face supérieure, (b) Image couleur de la face supérieure, (c) Cartographie des angles de la face inférieure, (d) Image de la face inférieure

Calcul du module longitudinal : extensomètre virtuel et fenêtre glissante

Le module d'élasticité local équivalent le long de l'éprouvette peut être calculé grâce à un extensomètre virtuel de longueur δ (Fig. 4). Ce module est calculé en s'inspirant de la norme (EN 408 2012), c'est-à-dire qu'une régression linéaire est calculée entre 10 et 40% de la force maximale estimée.

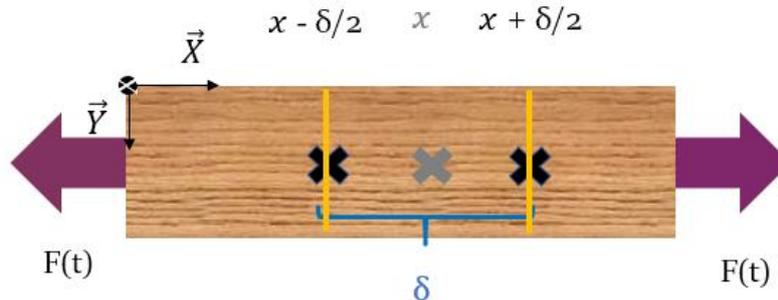


Fig. 4 : Essai de traction avec x la position suivant la longueur de l'éprouvette de centre de l'extensomètre, δ la longueur de l'extensomètre et $F(t)$ la force en fonction du temps

Dans la direction \vec{X} , le module élastique est calculé selon l'équation (1). La déformation est calculée comme un taux d'accroissement du déplacement comme le montre l'équation (2). Le déplacement est calculé comme la moyenne des déplacements sur la largeur de l'éprouvette (bandes jaunes (Fig. 4a)). La contrainte est le rapport de la force divisée par la section de l'éprouvette (équation 3). Avec cette méthode, un module local peut être calculé sur chaque point de la longueur de l'éprouvette. La zone centrale peut être balayée sur les 90 mm de longueur de la zone d'intérêt grâce à l'extensomètre virtuel d'une longueur $\delta = 50$ mm. Le type de résultats obtenu pour une éprouvette est représenté dans la Fig. 5.

$$E_{xx}(x) = \frac{\sigma}{\varepsilon_{xx}(x)} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{xx}(x) = \frac{u(x + \delta/2) - u(x - \delta/2)}{\delta} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{Force}{Section} \tag{3}$$

$$u(x) = \frac{1}{19 - 1 + 1} \sum_{i=1}^{19} u(x, y_i) \quad (4)$$

avec $E_{xx}(x)$ le module d'élasticité local en MPa, $\varepsilon_{xx}(x)$ la déformation, σ la contrainte en MPa, $u(x)$ le déplacement en mm et δ la longueur de l'extensomètre en mm.

Résultats et discussion

Pour chaque éprouvette, les résultats obtenus sont présentés Fig. 5. Cette figure permet de montrer qu'il y a une forte corrélation entre le module d'élasticité longitudinal et l'angle en chaque point de la cartographie. En superposant toutes les éprouvettes sur un même graphique, on peut déterminer les propriétés mécaniques en considérant une loi de comportement orthotrope (Fig. 6). Le module longitudinal, de 16.3 GPa, paraît en accord avec la bibliographie malgré un module transversal ainsi qu'un module de cisaillement assez faible qui montre peut-être une forte influence des fissures liées au procédé de fabrication des placages.

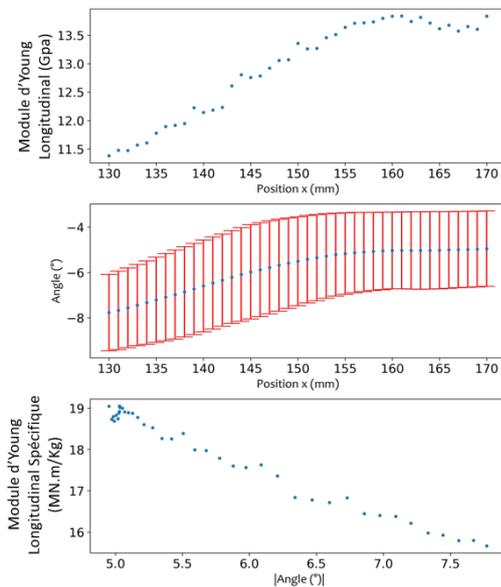


Figure 5 : Exemple de résultat d'une éprouvette : module longitudinal et mesure de l'angle en fonction de la position sur la longueur de l'éprouvette, module spécifique longitudinal en fonction de l'angle

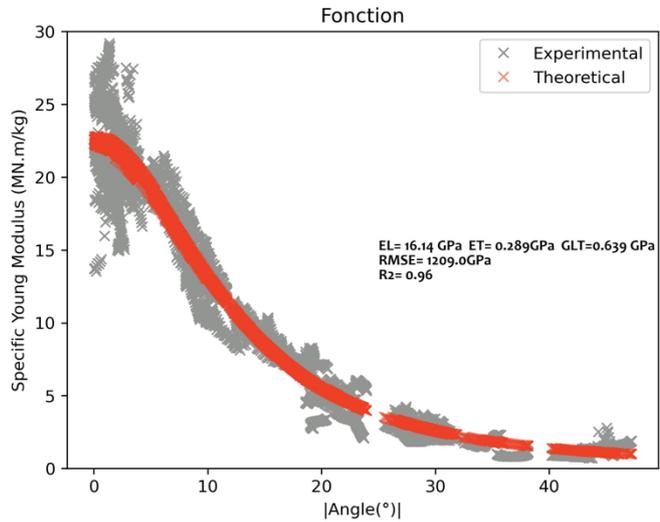


Figure 6 : Optimisation et superposition des propriétés mécaniques en fonction d'une loi de comportement orthotrope (RMSE = Root Mean Square Error, R^2 = coefficient de détermination, EL = module longitudinal et ET = module transversal, GLT = module de cisaillement)

Conclusion et perspectives

Ce protocole expérimental a pour but de caractériser les propriétés mécaniques des placages afin de créer un modèle prédictif se basant sur des mesures physiques non destructives. L'orientation des fibres paraît être un paramètre important dans la variabilité du bois.

L'approche du calcul du module élastique est assez simpliste pour comprendre le comportement local. Une identification inverse des propriétés mécaniques pour chacune des éprouvettes avec un modèle éléments finis intégrant l'orientation des fibres semble incontournable à la compréhension de la déformation et des différences de propriétés locales.

Remerciements

Ce travail est soutenu par le programme « Investissement d'Avenir », projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-003).

Références

Cha J-K (2003) Tensile Strength of Clear Thin Wood Samples in Relation to the Slope of Grain. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2003. Vol. 31, n° 3, pp. 35-41.

Duriot R (2021). Développement de produits LVL de douglas aux propriétés mécaniques optimisées par l'exploitation de la mesure en ligne de l'orientation des fibres lors du déroulage
Thèse de doctorat. HESAM.

EN 408 (2012). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.

Faydi Y (2017) Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. Thèse de doctorat. ENSAM.

LVL Handbook Europe (2019). Federation of the Finnish Woodworking Industries. ISBN 978-952-94-2346-0.

Nyström J (2003) Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 41, n° 1-3, pp. 91-99. DOI 10.1016/S0168-1699(03)00045-0.

Pramreiter M, Stadlmann A, Huber C, Konnerth J, Halbauber P, Baumann G, Mülher U (2021) The Influence of Thickness on the Tensile Strength of Finnish Birch Veneers under Varying Load Angles. *Forests*. Vol. 12, n° 1, pp. 87. DOI 10.3390/f12010087.

Simonaho S-P, Silvennoinen R (2002) Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. *Optics and Lasers in Engineering*. 2002. Vol. 41, n° 1, pp. 95-103. DOI 10.1016/S0143-8166(02)00144-6.

Viguier J, Bourgeay C, Rohumaa A, Pot G, Denaud L (2018) An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials*. Vol. 181, pp. 146-155. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050.

Automatisation de la détection des fissures de déroulage par apprentissage profond

MARC Caroline¹, MARCON Bertrand¹, DENAUD Louis¹, GIRARDON Stéphane¹,
BUTAUD Jean-Claude¹

¹Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté,
HESAM Université, F-71250 Cluny, France
Caroline.Marc@ensam.eu

Mots clés : Fissures de déroulage ; Réseau de neurones : U-Net ; Placages

Contexte et objectif

Les fissures dues au processus de déroulage ont un effet significatif et largement documenté sur les propriétés mécaniques des placages produits ainsi que sur leurs aptitudes au collage (DeVallance et al. 2007, Pot et al. 2015, Rahayu et al. 2013, Rohumaa et al. 2013, 2016). Historiquement, pour mesurer ces fissures, la méthode de référence consistait en l'imprégnation des placages par un colorant suivie de leur observation au microscope (Lutz 1960, Movassaghi 1985). Ces mesures étant lourdes et fastidieuses, de nouvelles méthodes ont dû être mises au point, et notamment des mesures acoustiques (Tomppo et al. 2009, Wang et al. 2001). Denaud et al. (2007) ont utilisé cette approche en enregistrant, près du couteau, le son émis durant le déroulage et les efforts de coupe pendant le processus de déroulage, permettant ainsi de prédire les fréquences d'apparition des fissures. Ces mesures ont ensuite été confrontées aux profils de rugosité des placages obtenus ultérieurement en utilisant un capteur de distance, tout en les fléchissant pour ouvrir les fissures. Bien que ces mesures aient permis d'estimer avec précision le positionnement des fissures, elles n'ont toutefois pas fourni de données quantitatives sur leur profondeur.

C'est en partant de cette remarque que le Système de Mesure Optique des Fissures (SMOF, Fig. 1) a pu être développé au LaBoMaP (Palubicki et al. 2010). Dans cette nouvelle approche, les mesures sont effectuées sur le chant de bandelettes de placage, ce qui autorise l'observation d'un grand nombre de fissures et offre une cartographie complète de leur géométrie dans le plan RT. Le SMOF permet d'obtenir facilement des images des fissures sur la totalité du chant d'un placage, mais la détection des fissures n'est pas encore automatisée et doit être effectuée manuellement, or Antikainen et al. (2015) démontrent un effet significatif de l'opérateur dans la mesure de la profondeur des fissures sur les images.

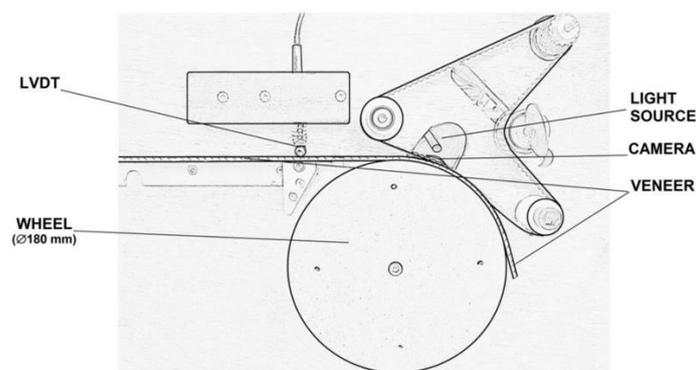


Fig. 1 : Système de Mesure Optique des Fissures (SMOF) (Rohumaa et al., 2018)
(LVDT = linear variable differential transformer)

L'objectif de cette étude est donc d'automatiser le processus de détection des fissures de déroulage à partir d'images de placages obtenues à l'aide du SMOF. Cette automatisation s'opère en utilisant la segmentation sémantique, une technique relevant du domaine de la vision par ordinateur. Elle consiste à attribuer une classe d'appartenance à chaque pixel d'une image, en l'occurrence deux classes dans notre cas : « 1 » pour les fissures et « 0 » pour l'absence de fissures. Cette segmentation sera réalisée au moyen d'un réseau de neurones convolutifs, plus précisément d'un réseau suivant l'architecture d'un U-Net, qui sera plus amplement décrite par la suite. Ce type de réseau, initialement développé pour un usage dans l'imagerie médicale (Ronneberger et al. 2015), a été sélectionné pour cette étude en raison de sa primauté dans les applications de segmentation sémantique.

Matériels et méthodes

Architecture du réseau de neurones : U-Net

Comme illustré dans la Fig. 2, un U-net est composé d'une partie encodeur (côté gauche), qui réduit la résolution spatiale de l'image en extrayant des caractéristiques, et d'une partie de décodeur (côté droit) qui restaure la résolution tout en produisant une carte de segmentation. Les caractéristiques de l'encodeur sont fusionnées avec les activations du décodeur pour conserver les détails spatiaux à différentes échelles dans l'image, ce qui donne au réseau sa forme en U. L'architecture du réseau et les différentes opérations le composant sont décrites plus précisément par Ronneberger et al. (2015). Dans le cas de la présente étude, le réseau construit gère en entrée des images en niveau de gris de taille 128×128 pixels², comporte 4 étapes de réduction de résolution, puis 4 étapes d'agrandissement, et permet d'obtenir en sortie une image binaire ayant les mêmes dimensions que l'image d'entrée.

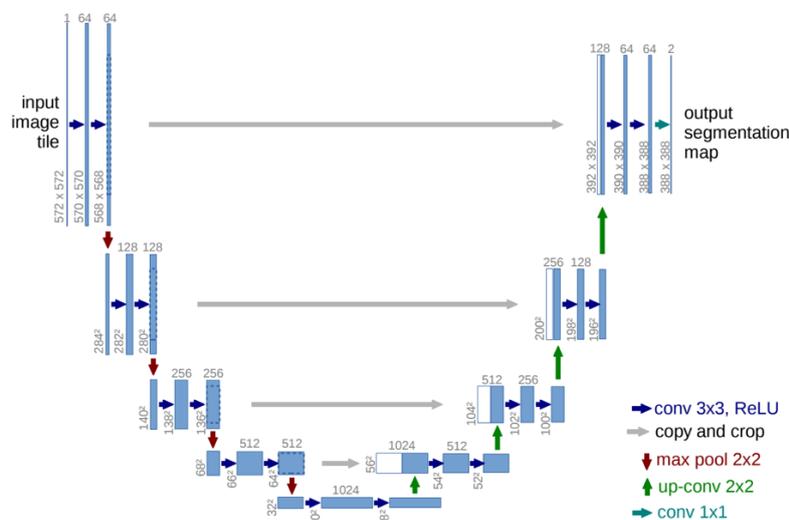


Fig. 2 : Exemple d'architecture d'un U-net, chaque boîte bleue correspond à une carte de caractéristiques à canaux multiples, chaque boîte blanche à une carte copiée, et les flèches indiquent les différentes opérations (Ronneberger et al. 2015).

Création du jeu de données

Avant de pouvoir utiliser le réseau, il est nécessaire de l'entraîner sur un jeu de données composé d'une part des images de profils de placages (images d'entrées) et d'autre part les masques binaires correspondant (vérité terrain), avec uniquement des pixels noirs (0) à l'exception de ceux étant positionnés au niveau d'une fissure (pixel = 1). Pour créer ce jeu de données, comme illustré sur la Fig. 3, un placage de Douglas de 500 (R) \times 500 (L) mm² et 3 (T) mm d'épaisseur, ayant été déroulé sans barre de pression afin de présenter des fissures de

taille importante, a été découpé au laser en 10 bandelettes de 50 mm de long. Une image dans le plan RT de ces 10 bandelettes a été obtenue à l'aide du SMOF. Trois de ces images ont été sélectionnées pour servir de base pour les images d'entrées. Pour créer les masques de vérité terrain de ces 3 images, les pixels appartenant à une fissure ont manuellement été étiquetés. Sur ces 3 images, un total de 315 fissures ont été détectées et 295264 pixels ont été étiquetés (niveau 0 ou 1). Enfin, pour finaliser le jeu de données et avoir des images aux dimensions adaptées au réseau, une fenêtre de 128×128 pixels² balaye chacune des 3 images de placages avec un pas de 64 pixels dans les deux directions, ce qui a permis d'obtenir 5726 couples de sous-images. Ensuite, seuls ceux dont les images de vérité terrain comportent au minimum 10 pixels blancs sont sélectionnés, afin de ne pas entraîner le réseau sur une grande partie d'images complètement noires. Au final, le jeu de données comprend 3025 couples d'images.

Les 7 autres images obtenues avec le SMOF sont traitées avec le logiciel éponyme, qui permet de repérer la profondeur, la position et l'angle de chaque fissure comme illustré dans la Fig. 3. Ces informations permettront d'évaluer les performances du réseau de neurones.

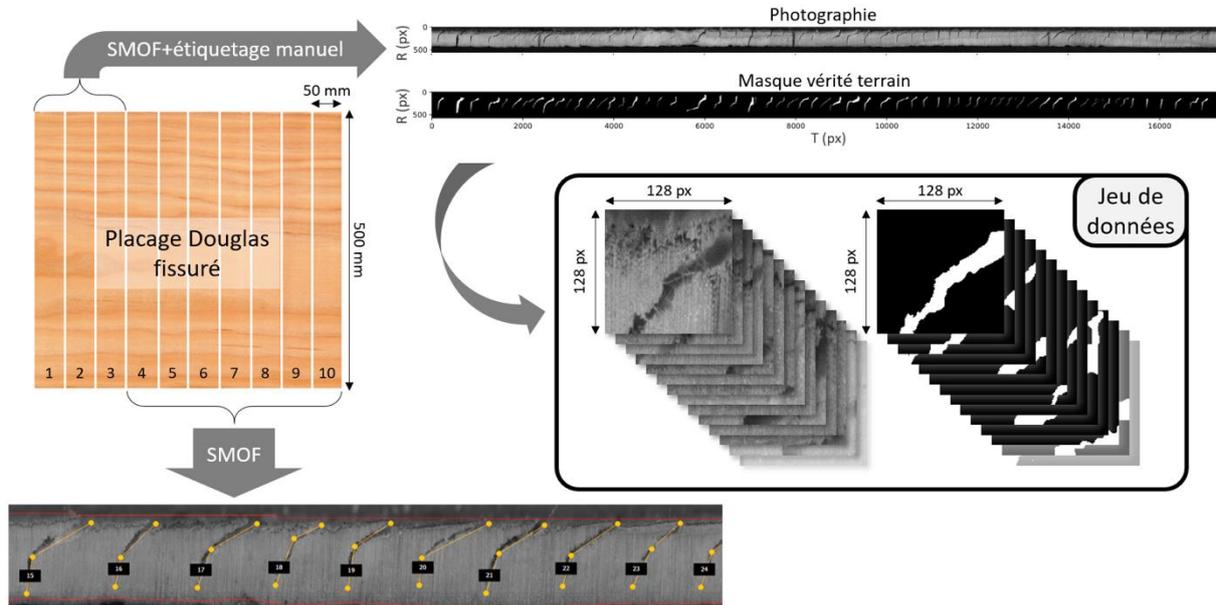


Fig. 3 : Schématisation de la création du jeu de données
(Résolutions spatiales : (R) 1 mm = 110 px, (T) 1 mm = 69 px)

Entraînement du réseau et détection des fissures

Avant l'entraînement du modèle, les données sont divisées en deux parties, les données d'entraînement (80%) et les données de test (20%), afin de pouvoir évaluer les performances du réseau sur des images n'ayant pas servi à l'entraînement. Les données d'entraînement sont ensuite elles-mêmes divisées en lots de 16 échantillons, et l'entraînement sur ces lots est effectué pendant 10 époques (10 cycles d'entraînement), cette durée étant suffisante pour la convergence de l'algorithme.

Le U-net ainsi entraîné fournit une prédiction de cartographie des fissures, où chaque pixel a une valeur comprise entre 0 et 1, qui correspond à la probabilité que le pixel appartienne à une fissure. Pour identifier les fissures individuellement sur un placage, la prédiction va tout d'abord être binarisée avec un seuil de 0,1, tous les pixels dont la valeur est supérieure à ce seuil seront alors considérés comme appartenant à une fissure (=1). Il est ensuite nécessaire de faire le tri entre les fissures correctement prédites et les erreurs d'interprétation du modèle. Pour cela, un algorithme simpliste et empirique sélectionne uniquement les amas de pixels dont l'aire est

supérieure à 1000 pixels, et dont le pixel le plus haut se trouve au niveau de la surface du placage.

Résultats et discussion

Evaluation du modèle

Comme illustré dans la Fig. 4a qui présente deux exemples de prédiction de fragments de fissures, le modèle paraît prédire correctement les fissures de manière qualitative. En effet, le fond de la fissure est adéquatement détecté dans un cas, et dans l'autre, même lorsque la fissure pourrait paraître discontinue, elle est parfaitement prédite. Pour évaluer plus précisément ses performances, la précision et le rappel sont calculés sur les données de test. La précision du modèle est de 0,88, ce qui signifie que 88% de ses prédictions positives sont correctes, minimisant ainsi les faux positifs. Le rappel atteint 0,92, indiquant que le modèle détecte 92% des pixels appartenant réellement à une fissure. Ces résultats démontrent l'efficacité du modèle pour la détection de fissures.

Détection des fissures

Les fissures des 7 bandelettes évoquées précédemment n'ayant pas servi à l'entraînement du réseau sont prédites par le modèle, et ces estimations sont ensuite comparées à la détection manuelle effectuée à l'aide du SMOF. La Fig. 4b présente cette comparaison en représentant la répartition de la profondeur et l'espacement inter-fissures pour chaque bande et chaque méthode de détection. Le nombre de fissures détectées y est également indiqué, et le plus grand écart de nombre de fissures entre les deux méthodes n'excède pas 5,7% des fissures d'une bande.

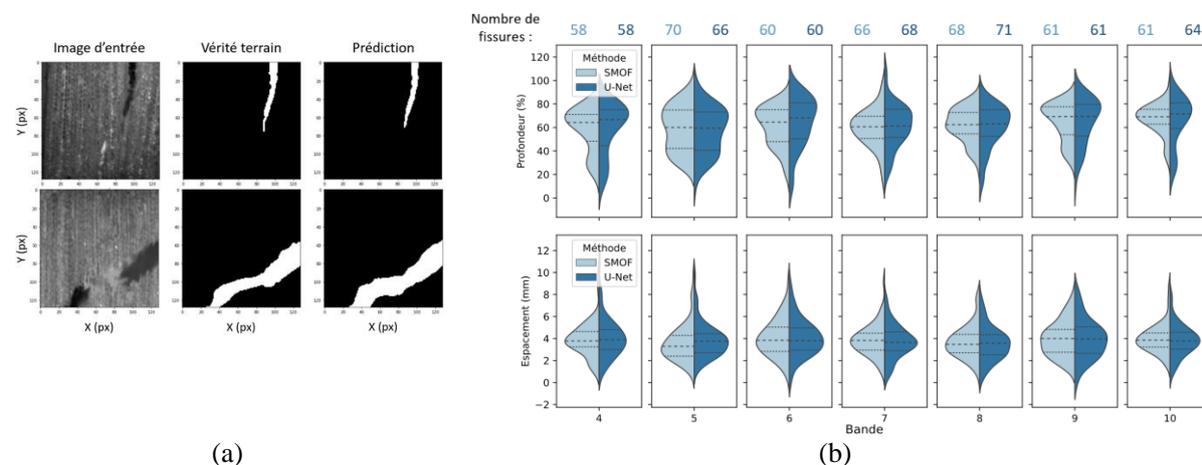


Fig. 4 : (a) Prédiction d'image du lot de test, (b) Comparaison des profondeurs et de l'espacement inter-fissures entre les fissures détectées manuellement (« SMOF ») et celle prédite par le modèle (« U-Net »)

Discussion

Les données exposées sur la Fig. 4, que ce soit la prédiction correcte des images de test, ou la similitude dans la répartition des caractéristiques des fissures entre les deux méthodes de détection, montrent des résultats encourageants. Cependant, même si la répartition est similaire cela ne signifie bien évidemment pas que chaque fissure est correctement détectée une à une, il serait donc intéressant d'effectuer une comparaison plus systématique. De plus, l'algorithme de détection des fissures, élaboré de manière empirique, reste pour l'instant très rudimentaire et n'est probablement pas adapté aux fissures moins profondes.

Conclusion et perspectives

En conclusion, cette étude met en avant l'efficacité du modèle U-Net dans l'automatisation de la détection des fissures de déroulage à partir d'images de placages obtenues via le SMOF. Les performances du modèle, avec une précision de 0,88 et un rappel de 0,92, sont prometteuses. Cependant, des améliorations potentielles incluent une optimisation de l'algorithme de détection des fissures, et éventuellement un entraînement du réseau sur différentes essences et différents taux de fissuration. En somme, cette étude constitue une avancée encourageante vers l'automatisation de la détection des fissures de déroulage, qui n'était jusqu'à présent possible qu'à travers des méthodes manuelles.

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 du réseau scientifique Xylomat financée par l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST qui largement été utilisée pour réaliser cette étude.

Références

- Antikainen T., Eskelinen J., Rohumaa A., Vainio T., Hughes M. (2015) Simultaneous measurement of lathe check depth and the grain angle of birch (*Betula pendula* Roth) veneers using laser trans-illumination imaging. *Wood Science and Technology*, 49(3): 591-605. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0718-8>
- Denaud L., Bleron L., Ratle, A., Marchal R. (2007) Online control of wood peeling process : Acoustical and vibratory measurements of lathe checks frequency. *Annals of Forest Science*, 64(5): 569-575.
- DeVallance D., Funck J., Reeb J. (2007) Douglas-fir plywood gluebond quality as influenced by veneer roughness, lathe checks, and annual ring characteristics. *Forest Products Journal*, 57(1/2): 21.
- Lutz J.F. (1960) Heating veneer bolts to improve quality of Douglas-fir plywood, Forest Service U. S. Department of Agriculture
- Movassaghi E. (1985) Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage, Thèse Docteur Ingénieur, INPL Nancy, 181 p.
- Palubicki B., Marchal R., Butaud J.-C., Denaud L.E., Bleron L., Collet R., Kowaluk G. (2010). A Method of Lathe Checks Measurement; SMOF device and its software. *European Journal of Wood and Wood Products*, 10: 151.
- Pot G., Denaud L.E., Collet R. (2015) Numerical study of the influence of veneer lathe checks on the elastic mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made of beech. *Holzforschung*, 69(3): 247-316. doi: 10.1515/hf-2014-0011
- Rahayu I., Denaud L., Butaud J.C., Pot G. (2013) Qualités technologiques des panneaux contreplaqués et LVL réalisés avec les nouveaux cultivars de peuplier. *Forêt-entreprise*, 213, 39-42.
- Rohumaa A., Hunt C.G., Hughes M., Frihart C.R., Logren J. (2013) The influence of lathe check depth and orientation on the bond quality of phenol-formaldehyde-bonded birch plywood. *Holzforschung*, 67(7): 779-786.

Rohumaa A., Antikainen T., Hunt C.G., Frihart C.R., Hughes M. (2016) The influence of log soaking temperature on surface quality and integrity performance of birch veneer. *Wood Science and Technology*, 50(3): 463-474. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0805-5>

Rohumaa A., Viguier J., Girardon S., Krebs M., Denaud L. (2018) Lathe check development and properties: Effect of log soaking temperature, compression rate, cutting radius and cutting speed during peeling process of European beech (*Fagus sylvatica* L.) veneer. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(6): 1653-1661. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1341-9>

Ronneberger O., Fischer P., Brox, T. (2015) U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, Actes de la 18^{ème} conférence internationale Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015, Munich (AI), 5-9.10.15, partie III 18, pp. 234-241.

Tomppo L., Tiitta M., Lappalainen R. (2009). Ultrasound evaluation of lathe check depth in birch veneer. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(1): 27-35.

Wang J., Biernacki J., Lam F. (2001) Nondestructive evaluation of veneer quality using acoustic wave measurements. *Wood science and technology*, 34(6): 505-516.

Combined simulation and machine learning for process optimization in wood industry

BOLES George¹, POMMIER Régis¹, TRAORE Mamadou Kaba²

¹Université de Bordeaux – I2M

²Université de Bordeaux – IMS

george.boles@u-bordeaux.fr

Keywords: Simulation; Digital Twin; Optimization; Sawmills; Decision support tools.

Context and objectives

The wood industry is one of the major industries in the Nouvelle Aquitaine and the lands of Gascogne region, the dominant species in this region is maritime pine. Sawmills (Fig.1) are the main industrial process that transforms wood from its original form -wood logs- into products, such as pallets, wood boards used in furniture, etc. However, most of these sawmills are old, equipped with machines from the 1970s, and their condition varies depending on the renovations carried out. Some of them have even had to close their doors due to insufficient income, due to the low capacity of their machines to optimize wood sawing, resulting in losses of raw material and therefore revenue. The objective is to create a simulation-based decision support tool that is capable of giving the managers an idea of the effect of investing in new machines not only but the detection of bottle necks and the crucial machines that needs to be replaced (Opacic 2010, Opacic et al. 2018). Not only but also calibrate the rate and speed of production in each line to have a smoother production flow.

Material and methods

By using the production monitoring and the data of the Gascogne bois saint symphorien sawmill for the year 2022, including the machine's production capacity, speed, stops and breakdowns and number of wood logs treated per day, a simulation model will be created. After analysing these data, a distribution laws will be used to feed the model to simulate and act as a digital twin for the sawmill. AnyLogic software is used for simulation (Borshchev 2013). Before the simulation comes the basic step of modelling using a general modelling language called HiLLS (Samuel et al. 2019). These tools: AnyLogic and @Risk software which is used to data fit production monitoring data, have been successfully used in a study for engineered wood products mill (Opacic et al. 2018).

First results

The production monitoring data is a complex rich data that every sawmill should collect it for its own production, it provides performance indicators and helps directors to improve the production if used and analysed in the right way. Using pareto tool and PDCA cycle (Sokovic et al. 2009) we can find the most important problems in the sawmill and work on it for continues improvement. Pareto is a powerful simple indicator tool that shows the actual performance for the industrials.

The simulation using AnyLogic for the sawmill is in progress as it changes by time to include all the real production rates collected from the sawmill and also other collected information from the production monitoring such as number of working hours, stops and other data to create a digital twin that acts as a real numerical sawmill with real production rates.

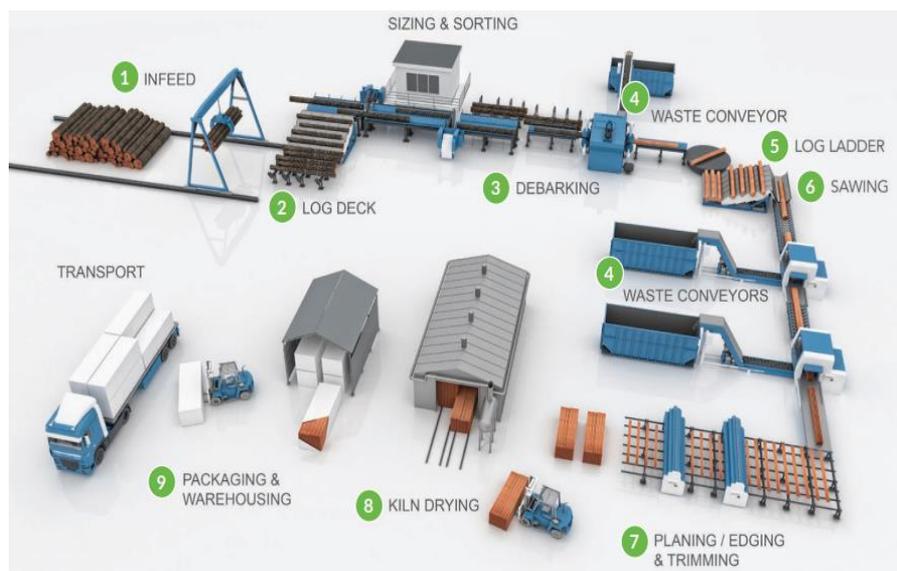


Fig. 1: Simplified classical industrial sawmill process by Regal Rexnord sawmills

Acknowledgements

I would like to thank Professor Régis POMMIER and Professor Mamadou Kaba Traoré for the opportunity that they gave me and for the frequent help they provide me during my studies. I also would like to thank my industrial supervisor, Mr. Laurent CASTETS and Gascogne Bois Saint Symphorien sawmill and all the workers for helping me during my studies in the sawmill. The project is funded by the Agence nationale de la recherche (ANR) and Gascogne Bois.

References

- Borshchev A. (2013) The big-book of Simulation Modeling Multimethod Modeling with AnyLogic-6.
- Opacic L. (2010) Developing simulation models to improve the production process of a parallam mill.
- Opacic L., Sowlati T., Mobini M. (2018) Design and development of a simulation-based decision support tool to improve the production process at an engineered wood products mill. *International Journal of Production Economics*, 199, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.03.010>
- Samuel K.G., Maiga O., Kaba Traoré M., Traoré M.K. (2019) Formal verification with HiLLS-specified models: A further step in multi-analysis modeling of complex systems. *International Journal of Model-Ing*, 10(05). <https://doi.org/10.1142/S1793962319500326i>
- Sokovic M., Jovanović J.Š., Krivokapic Z., Vujovic A. (2009) Basic Quality Tools in Continuous Improvement Process. <http://www.rebusproject.net>

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

Al FAY Alaa¹, JULLIEN Delphine¹, CORN Stéphane², ARNOULD Olivier¹,
LANGBOUR Patrick³

¹Équipe Bois, LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

²Équipe DMS, LMGC, Univ Montpellier, IMT Mines Alès, CNRS, Alès, France

³UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier, France

alaa.al-fay@umontpellier.fr

Key words: wood; vibration; modal analysis; elastic constants; FEA

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. The density of wood is 3 to 15 times lower than that of metals, due to its cellular structure, whose walls are essentially made up of layers of long-fiber nano-composites. This makes wood one of the most efficient materials for many applications. However, the knowledge of the transverse (E_R radial modulus and E_T tangential modulus) 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 for material selection since, generally, only the longitudinal elastic modulus is available, whereas the other elastic properties are essential for high-end and high-performance applications.

The aims of this study are: to rapidly estimate as many elastic parameters as possible from a single wood sample using the modal analysis of its vibrational impulse response; to investigate the damping characteristics and relate them to viscous behaviour; to enrich the woods database with orthotropic elastic constants; and to analyze the correlations between macroscopic viscoelastic behavior and ultrastructural parameters, including density and microfibril angle (Al Fay et al. 2022).

Material and methods

Samples

The wood samples used in this study, specifically Paulownia and Beech, all had dimensions of 130×60×10 mm³ and were taken from CIRAD Xylothèque (Langbour et al. 2019), an extensive collection of wood species (over 34 000 samples of 8 400 species). Additionally, two other materials, polystyrene (PS) and a unidirectional glass fiber/epoxy matrix composite, were also investigated with the same sample dimensions, serving as a fundamental step towards mastering the essential tools required to study more complex materials, such as wood.

Experimental set-up

The method used is a non-destructive test by impulse modal analysis, known for its efficiency to allow a large number of elastic constants to be determined from a single sample (Longo et al. 2018). To achieve free-free boundary conditions, all samples were mounted on soft elastic supports. Vibrations were induced in the sample using either a light hammer or a tiny steel ball. The oscillations were measured using either a high-sensitivity microphone (PCB - 130F21),

with a frequency range from 10 Hz to 20 kHz, or an accelerometer (PCB - 352A26), with a frequency range from 2 Hz to 10 kHz and a cut-off frequency of 30 kHz. Signal acquisition was carried out using a suitable device capable of simultaneously handling up to 4 channels (NI-4431). Finally, the data acquired were analysed using ModalVIEW software to extract the modal parameters, including the resonance frequencies and the corresponding damping factors.

Test configurations

Different configurations were tested for each sample, so called “out of plane” and “in plane”, representing the direction of impact and sensor measurement. For each configuration, different positions were considered for both the microphone or accelerometer and the impact, which had two primary objectives. First, we aimed to measure the first resonance frequencies and their associated damping exhaustively. Secondly, we needed to link each measured resonance frequency with its corresponding computed mode, based on the relative positions of the impact and the microphone in relation to the computed vibration nodes using the initial set of elastic constants (see below). This link is crucial for accurately matching measured resonance frequencies with calculated ones.

Inverse identification of elastic constants

The inverse identification process of the elastic properties from the resonance frequencies is an adaptation of the one described in Longo et al. (2018). First of all, the stiffness matrix coefficients need to be initialised. This was done for polystyrene using data from Yadav's thesis (Yadav 2019). These values were determined through dynamic mechanical analysis (DMA) method. For the glass fiber/epoxy composite material, the initial values were calculated using the Mori-Tanaka homogenization scheme in Digimat software². For wood, we started by initializing the stiffness matrix coefficients using the sample density and the empirical relationships from Guitard and El Amri (1987). Subsequently, modal shapes and frequencies are computed using Cast3m FEA software³. This model is capable of considering the orthotropy of wood and the disorientation of rings (or even of the grain) in the sample with a cylindrical coordinate system. Additionally, we computed resonant frequencies and modal shapes faster by using a Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) program (Fig 2008), using a Rayleigh-Ritz method with each component of the displacement expand in a Cartesian power series, thus taking into account the orthotropy of wood but in a Cartesian coordinate system (flat rings parallel to one of the lateral faces of the samples, grain in the longitudinal direction of the samples). The computed results are then associated with the measured resonance frequencies using the different test configurations explained above. A preliminary parametric sensitivity analysis, of the frequency of each mode relatively to the different elastic constants, is performed to obtain a sensitivity matrix. This analysis serves two main purposes: firstly, to identify which elastic constants can be reliably obtained, ensuring more robust results; and secondly, to conduct multi-step minimization. This approach is based on an iterative process to optimize elastic constants by minimizing the least squares error between experimental and computed resonance frequencies. Additionally, a matching and tracking of eigenmodes during the identification process is done.

² <https://hexagon.com/products/digimat>

³ <http://www-cast3m.cea.fr/>

Results

Polystyrene (isotropic case)

After calculating the sensitivity matrix, we identified polystyrene's elastic constants through various mode combinations, initially considering all 13 measured modes with frequencies ranging from 1.413 to 8.834 kHz, and then only 2 close modes at a time, each sensitive to E (Young's modulus) or G (shear modulus). The results indicated that it is feasible to identify the elastic constants (E , G , and subsequently ν) using only 2 modes, one of bending and the other of torsion. Furthermore, we observed that the frequency range of the selected modes influences the values of the “apparent” elastic constants. This effect is attributed to the viscoelastic properties of the material. Moreover, using an orthotropic model with 13 measured frequencies, slight differences were observed in Young's and shear moduli across different directions. This suggests a small anisotropy that may be attributed to the manufacturing process of the sample.

Unidirectional glass fiber/epoxy matrix composite (transverse isotropic case)

The study initially used 11 measured frequencies (ranging from 2.055 to 19.055 kHz) to calculate a sensitivity matrix. The results revealed that several modes were highly sensitive to three elastic constants E_1 , E_3 , and G_{13} (3 being the longitudinal direction of the sample and 1 its width). However, some modes showed only moderate sensitivity to G_{23} and G_{12} , and none were sensitive to E_2 due to the small plate thickness. All the measured frequencies were almost not sensitive to the three Poisson's ratios due to the sample's dimensions (Lauwagie et al. 2010) among others. However, our goal remained the successful identification of all five elastic constants (E_1 , E_3 , G_{13} , G_{23} , and G_{12}). To achieve this, we conducted the identification process using only five frequencies, selecting the most sensitive modes to each of these elastic constants. Results showed that the elastic constants of the unidirectional composite can be calculated with only these 5 frequencies. Furthermore, we intend to explore the optimal number of frequencies for determining elastic constants in greater detail during this thesis. The damping factor associated to the bending modes in the longitudinal direction 3 (parallel to the glass fibers) was observed to be lower than the ones of torsion modes or bending modes in the transverse direction. This difference can be attributed to the higher viscosity of the epoxy matrix compared to the glass fibers. In fact, the matrix is more stressed than the glass fibers in torsion and transverse bending while glass fibers are most stressed in the longitudinal bending mode.

*Beech (*Fagus sylvatica*) and Paulownia (*Paulownia tomentosa*) (orthotropic case in cartesian and cylindrical coordinate system, in progress)*

Our objective was to identify the elastic constants of Beech and Paulownia 130×60×10 mm³ samples. To account for the curvature and possible disorientation of growth rings relatively to the lateral faces of the wood samples, we mathematically estimated the position of the pith of the tree using scanned images of the rings on both cross-section faces of the plate and use it in Cast3m FEA software for the numerical modal analysis. For Paulownia samples exhibiting growth rings roughly flat and parallel to the thickness (quarter-sawn samples), we can use the RUS program (Fig 2008) for the modal analysis too and compare the results with the use of Cast3m. We conducted an analysis by computing the sensitivity matrix using data from 5 measured frequencies (ranging from 1.732 to 8.301 kHz). Our findings indicate that these modes exhibit a high sensitivity, exceeding 30%, to three specific elastic constants E_R (radial direction), E_L (longitudinal direction), and G_{RL} (radial-longitudinal plane). This high sensitivity allows us to confidently identify these elastic constants. Additionally, there were a moderate sensitivity, ranging from 5% to 30%, to the elastic constants G_{TL} (tangential-longitudinal plane) and G_{RT} (radial-tangential plane). Our findings demonstrate that the RUS program has proved

to be very time-efficient effective in determining the elastic constants of wood samples that can be analysed within a Cartesian coordinate system. In the analysis of beech samples, for quarter-sawn wood with flat, parallel growth rings, two elastic constants (E_L and G_{RL}) can be confidently identified, but there is moderate sensitivity in resonance frequencies to three other constants (E_R , G_{TL} , and G_{RT}). In contrast, in flat-sawn samples with moderately curved rings parallel to the width, three specific elastic constants (E_T , E_L , and G_{TL}) can be confidently identified, with moderate sensitivity to the remaining two (G_{RL} and G_{RT}) based on resonance frequencies.

Conclusion

This study has provided valuable insights into the non-destructive measurement of the orthotropic elastic properties of wood samples through modal impulse response analysis. By exploring different materials, including polystyrene and a unidirectional glass fiber/epoxy matrix composite, our results have demonstrated the effectiveness of this method in identifying most of the elastic constants. Furthermore, for Paulownia and Beech wood samples, the study has shown that the method is capable of distinguishing variations in some elastic constants based on different sawing techniques. Further experiments, in particular using ultrasound, will validate these results and aim to identify the effect of the curvature of the rings and their orientation in the cross-section on the identifiable elastic constants.

Acknowledgements

The PhD thesis associated to this study is co-financed by Labex NUMEV and the Ecole Doctorale I2S of the University of Montpellier.

Referencess

Al Fay A., Jullien D., Corn S., Arnould O., Langbour P. (2022) Caractérisation par analyse vibratoire des propriétés viscoélastiques d'échantillons de bois dans leur diversité naturelle. 11^{èmes} Journées du GDR Sciences du Bois, Nice.

Fig M. (2008) Resonant ultrasound spectroscopy (RUS). Matlab® Central. <http://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11399-resonant-ultrasound-spectroscopy-rus>.

Guitard D., El Amri F. (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et le 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-biowoeb.cirad.fr/plateformes-equipements/bois-materiau/xylotheque> (last access: September 2023).

Lauwagie T., Lambrinou K., Sol H. et al. (2010) Resonant-based identification of the Poisson's ratio of orthotropic materials. Experimental Mechanics, 50, 437–447.

Longo R., Laux D., Pagano S. et al. (2018) Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): a comprehensive study. Wood Science and Technology, 52, 383–402.

Yadav P. (2019) Effets du temps et effets de couplage thermomécanique dans les polymères. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier.

Valorisation d'essences de feuillu

CURIAL Hugo¹, DENAUD Louis¹, Marcon Bertrand¹, VIGUIER Joffrey¹

¹Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

Hugo.Curial@ensam.eu

Mots clefs : bois feuillus ; déroulage; placage ; orientation des fibres ; propriétés mécaniques

Contexte et objectif

Le secteur de la construction 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) d'après le rapport du Ministère de l'Agriculture (Agreste 2022, Fig. 1a). La forêt française étant composée à plus de deux tiers de feuillus (IGN 2022, Fig. 1b), l'inadéquation entre la ressource et les besoins en construction (essentiellement résineux) explique pour partie ce déficit commercial.



Fig. 1 : (a) Balance commerciale par zone de l'ensemble des produits de la filière bois et dérivés (Agreste, 2022 et Direction générale des douanes et des droits indirects) ; (b) Répartition du volume de bois vivant sur pied en France selon les essences et répartition Feuillus/Résineux (IGN, 2022).

Cette thèse s'inscrit donc dans un objectif d'amélioration de la valorisation des bois feuillus dans la construction, non seulement pour une utilisation structurelle, mais aussi en revêtement pour la menuiserie et l'agencement. Le chêne a déjà repris sa place dans ces applications via des développements adaptés qui pourront être développés pour d'autres essences. Le procédé de déroulage permet la fabrication de produits permettant de répondre à ces différents secteurs. C'est un procédé de première transformation du bois au cours duquel un billon de bois est entraîné en rotation sur un couteau. Ce couteau est animé d'un mouvement de translation en direction du centre de rotation du billon dont l'asservissement est notamment dépendant de l'épaisseur du placage désirée. Ces mouvements combinés produisent un ruban continu. Il s'agit dans cette thèse de caractériser l'aptitude au déroulage et les qualités des produits du déroulage (placages et produits reconstitués) pour des essences feuillues peu utilisées à ce jour et présentant un potentiel de récolte intéressant.

Matériel et méthode

Les différentes essences seront déroulées sur la chaîne de déroulage instrumentée du LaBoMaP présentée en Fig. 2a. Le déroulage des billons commençant par l'étuvage pour certaines essences, les paramètres de pré-traitement varieront et les efforts de coupe seront mesurés pour déterminer les meilleurs jeux de paramètres conduisant aux conditions de coupes les plus stables pour chaque essence considérée. La qualité des placages produits sera aussi caractérisée (à l'état vert et/ou à l'état sec) du point de vue de la fissuration (Pałubicki et al., 2009), de l'état de surface, de l'épaisseur (éventuelle variation), de l'orientation des fibres et de leurs ondulations, à l'aide des différents moyens de caractérisation du LaBoMaP montrés en Fig. 2b et 2c. Une fois déroulés, les placages seront transformés en différents produits techniques (LVL et contreplaqué) et testés mécaniquement.

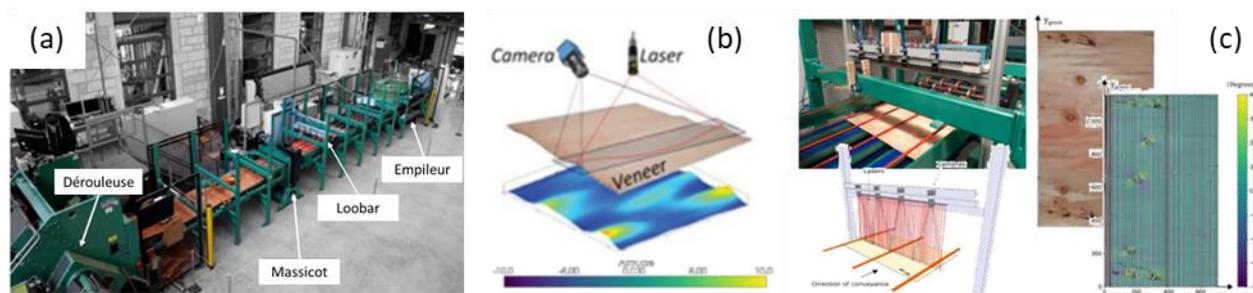


Fig. 2 : (a) Dériveuse industrielle instrumentée du LaBoMaP ; (b) Appareil de mesure des ondulations (SWAN) et exemple sur un placage sec ; (c) Système de mesure de l'orientation des fibres en lignes (LOOBAR). haut : implémentation du Loobar et schéma de principe (50 lasers points et 4 caméras), bas : exemple de mesure sur un placage de Douglas.

Résultats attendus

L'objectif est de produire une base de données exploitable permettant de conseiller les industriels du déroulage sur la faisabilité d'une exploitation commerciale des essences de bois feuillus disponibles dans les forêts françaises (approvisionnement local et ressource abondante). Les paramètres de coupe optimaux du processus ainsi que les propriétés des produits obtenus seront présentés pour donner une vue d'ensemble sur la ressource.

Remerciements

Le projet « Feuillus CHOC » (Valorisation des Feuillus en Construction par une Approche Holistique, Collaborative et Entrepreneuriale) dans lequel s'inscrit cette thèse est financé par l'ADEM (Agence de la transition écologique) dans le cadre de l'Appel à Projet « Stratégie Ville Durable et Bâtiments Innovants France 2030 ».

Références

- Agreste (2022) Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation – Synthèses Conjoncturelles – Avril 2022, n° 390. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynBoi22390/consyn390202204_ComextBois.pdf
- IGN, Résultats 2022 de l'Inventaire forestier national : une forêt française confrontée aux dérèglements climatiques, <https://ign.fr/espace-presse/resultats-2022-de-linventaire-forestier-national-une-foret-francaise-confrontee-aux-dereglements>
- Pałubicki B., Marchal R., Butaud J.C., Denaud L.E., Bléron L., Collet R., Kowaluk G. (2009) A Method of Lathe Checks Measurement; SMOF device and its software. Eur J of Wood and Wood Products, 68(2), 151-159. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0360-y>

Bienvenue à SACHA, une base de données interactive de CHArbons d'Afrique auStrale : un outil pour l'anthracologie

PUECH Elysandre^{1,2}, THERY-PARISOT Isabelle¹

¹Université Côte d'Azur, CNRS, CEPAM, UMR 7264, Nice, France

²Evolutionary Studies Institute, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2050,
South Africa

elysandre.puech@cepam.cnrs.fr

Mots clés : Anatomie du bois ; Archéologie ; Collection de référence ; Micrographie ; Clé d'identification

Contexte et objectifs

L'anthracologie, l'étude des charbons de bois en contexte archéologique, est un outil puissant pour étudier la végétation ligneuse et son évolution sous l'influence des changements climatiques et des activités humaines depuis la Préhistoire (*e.g.* Asouti et Austin 2005). La structure anatomique du bois, se préserve après carbonisation et les taxons peuvent être identifiés en microscopie optique à lumière réfléchie. Si l'anthracologie est largement utilisée dans les régions tempérées depuis les années 1970, les études en zones tropicales et subtropicales sont plus récentes et beaucoup moins nombreuses (pour une revue de la littérature voir Kabukcu et Chabal 2021). De plus, l'identification taxinomique, étape inhérente à toute analyse anthracologique, peut s'avérer extrêmement difficile dans ces régions riches en espèces ligneuses (*e.g.* Hubau et al. 2012). En effet, le taux d'identification diminue significativement dans les régions à forte diversité, en raison de la proximité anatomique de certains taxons, de leur variabilité intraspécifique et de leur plasticité phénotypique.

En Afrique australe, en particulier, les charbons de bois issus des résidus des foyers préhistoriques, sont remarquablement bien conservés (*e.g.* Chikumbirike et Bamford 2021). L'usage du feu a notamment joué un rôle fondamental dans le développement des sociétés préhistoriques de cette région incontournable pour la compréhension de l'évolution biologique et cognitive de notre espèce, *Homo sapiens* (*e.g.* Stockton 1981, Wadley 2013, Wurz 2019). Le potentiel des charbons comme outil de reconstruction de la végétation ligneuse passée a été exploité pour la première fois à la grotte de Boomplaas (Deacon et al. 1984). Bien que le nombre d'analyses anthracologiques soit depuis en constante augmentation dans la région (*e.g.* Allott 2006), il n'existe actuellement pas d'atlas ou de clé d'identification anatomique exhaustive des bois locaux, qui tiennent compte à la fois de la grande diversité des espèces ligneuses et de leur variabilité anatomique. Plus de 1000 espèces ligneuses indigènes comprenant des arbres, arbustes et lianes sont ainsi répertoriées dans cette région incluant neuf biomes différents reflétant des paysages très contrastés (Van Wyk 2013, Mucina et Rutherford 2006, Thuiller *et al.* 2006). Les divers régimes climatiques et reliefs qui caractérisent l'Afrique australe contribuent également à la grande variabilité *intra* spécifique de l'anatomie du bois qui est intrinsèquement liée aux conditions écologiques de croissance de l'arbre. Par conséquent, la précision de l'identification et la fiabilité de la reconstruction de la végétation ligneuse passée dépendent du degré de connaissance de l'anatomie des taxons et de l'écologie de la végétation actuelle.

Nous présentons ici la première clé d'identification assistée par ordinateur dédiée à l'étude des charbons de bois de l'Afrique australe. Cette base de données en ligne, appelée **SACHA** pour

Southern African CHArcoals, inclus actuellement les descriptions anatomiques de 68 taxons issus d'une collection de référence et 40 types archéologiques de charbons de bois. La clé d'identification est réalisée sur la plateforme en ligne Xper³ élaborée par le Laboratoire d'Informatique et de Systématique (LIS) de l'UMR7205 ISyEB et est spécifiquement conçue pour la gestion des données descriptives et l'identification interactive (Kerner *et al.* 2021).

Matériel et méthode

Les charbons modernes de comparaison

Des échantillons de bois issus de 84 spécimens modernes répartis en 20 familles, 57 genres et 73 espèces ont été collectés autour de deux sites archéologiques : Bushman Rock Shelter (Limpopo Province) et Olieboomspoort (Northern Province) (Fig 1). Les feuilles, graines, fruits et/ou fleurs ont été prélevés pour chaque spécimen pour garantir leur identification taxinomique réalisée par le *C.E. Moss Herbarium* de l'université de Witwatersrand à Johannesburg. Après avoir été carbonisés dans un four à moufle pendant 3 heures à 500 °C, chaque échantillon de bois a été examiné selon les trois dimensions du bois, transversale, radiale et tangentielle, pour une observation standard au microscope optique à lumière réfléchiée et à des grossissements allant de 100x à 1000x (Laney et Casteel, 1975). Les spécimens sont illustrés par des micrographies de chaque coupe, effectuées au microscope optique et au microscope électronique à balayage (MEB) du Centre Commun de Microscopie Appliquée (CCMA) de l'université Côte d'Azur. Les micrographies ont été téléversés sur la banque d'image de bois et charbons en ligne AnatomIA hébergée par le CEPAM à l'université Côte d'Azur (AnatomIA 2021 onwards) avant d'être incorporées à SACHA via des permaliens. Les spécimens de la même espèce et leurs sous-espèces (quand elles sont présentes dans la collection) ont été regroupés et apparaissent dans le même « item » dans la base de données. Ainsi, 68 taxons différents répartis au niveau du genre ou de l'espèce sont décrits dans SACHA.

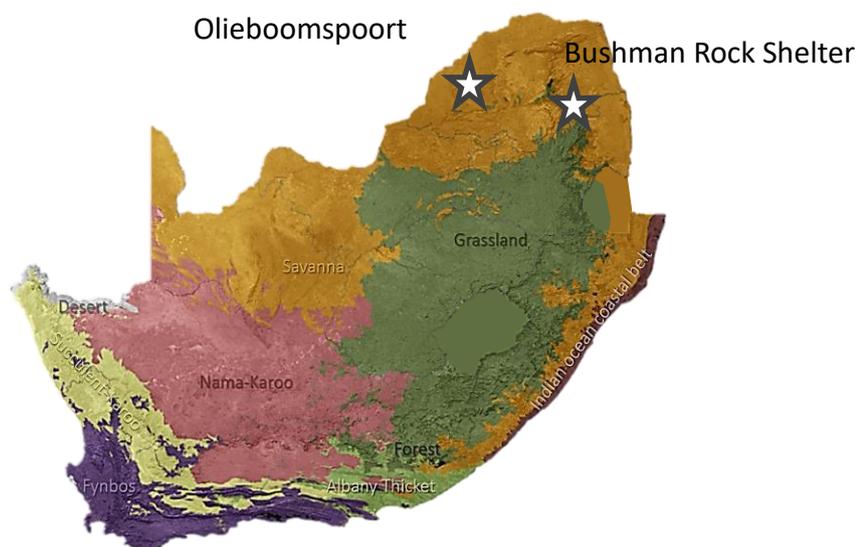


Fig 1 : Carte des biomes de l'Afrique du Sud (Mucina and Rutherford, 2006) avec la localisation des sites archéologiques autour desquels la collection de référence a été échantillonnée.

Les types de charbons archéologiques

La présente base de données a été initiée dans le cadre d'une étude anthracologique menée sur le site de Bushman Rock Shelter (BRS) (Puech *et al.* 2021, Fig 1). L'analyse des charbons de

BRS contribue à la fois (1) à la compréhension des interactions entre les chasseurs-cueilleurs passés et leur environnement en termes de gestion du combustible bois et d'usage du feu ; et (2) à documenter les changements de la végétation boisée à la transition Pléistocène - Holocène. Une description exhaustive des caractères anatomiques fut nécessaire pour chaque type de charbon archéologique individualisé sur le site. Le but étant de procéder à une identification objective en s'appuyant sur les collections de référence disparates et incomplètes qui sont actuellement disponibles (*e.g.* Neumann *et al.*, 2001, InsideWood 2004 onwards). La pertinence de publier les descriptions des types de charbons identifiés a déjà été démontrée dans les régions tropicales (*e.g.* Höhn et Neumann, 2018). C'est pourquoi, les types de charbons identifiés dans l'assemblage archéologique de BRS sont incorporés dans la base pour renforcer les futures analyses anthracologiques dans la région. Chaque type a été observé et photographié selon les mêmes standards que la collection de référence.

La plateforme Xper³ et les caractères anatomiques utilisés

Xper³ est une plateforme internet dédiée à l'édition collaborative de données descriptives et à l'identification de spécimens (Kerner *et al.* 2021). Cet outil est la version en ligne du logiciel Xper² (Ung *et al.* 2010, voir exemple pour les bois de la Guyane française Bodin *et al.* 2019) permettant aux utilisateurs de travailler simultanément à distance sur la même base de connaissances afin d'éditer, analyser et partager des données descriptives pour leur identification. Son utilisation est gratuite mais n'est pas open source, c'est-à-dire qu'elle est soumise à la licence Creative Commons « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Modification sous la même licence 3.0 France » (CC BY-NC-SA 3.0 Deed. Afin d'éditer SACHA sous Xper³, 43 descripteurs et plus de 200 états portant sur les caractères anatomiques, ainsi que sur des informations écologiques (*e.g.* altitude, port, type de végétation) et ethnobotaniques sont définis en langue anglaise et illustrés (Fig 2). Les caractères anatomiques décrits suivent principalement la liste proposée dans la base Anthrakos pour les bois de l'Amazonie (Scheel-Ybert 2012, 2023), qui sont spécifiquement adaptée pour l'anthracologie. Ces caractères microscopiques sont dérivés de la liste publiée par l'IAWA pour l'identification des feuillus (Wheeler *et al.* 1989). Les taxons décrits ainsi que les descripteurs sont illustrés. Des outils d'analyses permettent de réaliser des matrices de corrélation entre taxons et groupes de taxons ainsi que de tester la conformité de la base. Enfin, une fois créée, tout utilisateur peut interroger la base pour identifier un spécimen inconnu ou générer une clé d'identification (Fig 3).

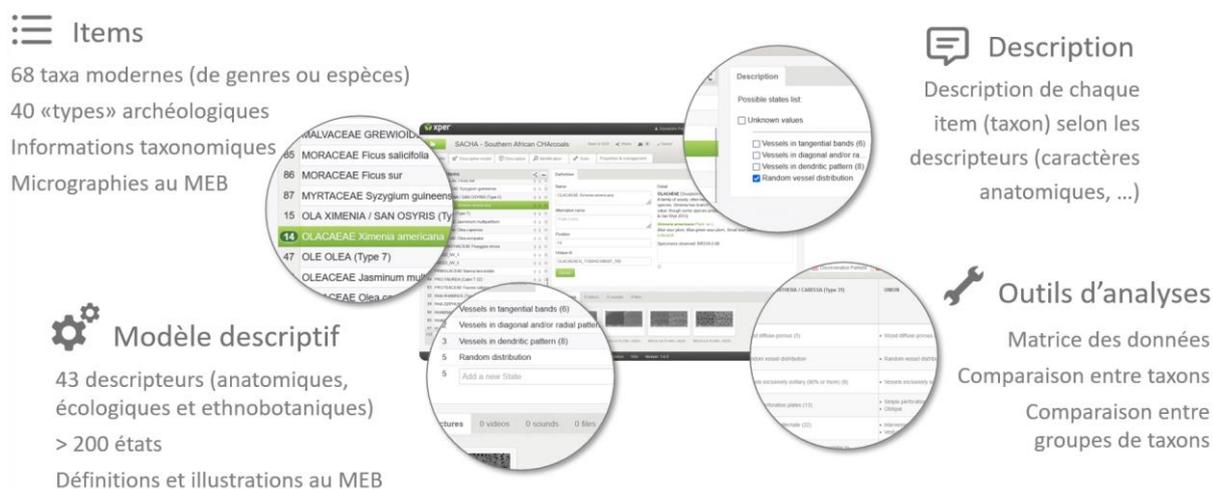


Fig 2 : Schéma explicatif du mode édition pour construire la base de données



Fig 3 : Schéma explicatif du mode identification pour interroger la base sur un spécimen archéologique

Discussion et perspectives

La création d'une collection de bois de référence des espèces indigènes est indispensable pour assurer la fiabilité des identifications taxinomiques des charbons archéologiques. SACHA est le premier pas vers une clé d'identification numérique de la zone d'étude, certes très partielle, mais qui se veut collaborative. Ainsi, tout spécialiste du bois pourra librement soumettre d'autres descriptions et images de spécimens de la région qui seront envoyées pour validation par les auteurs de la base. Cette base permet également de partager et de communiquer avec des anthracologues expérimentés pour discuter des identifications proposées et de faciliter l'apprentissage des étudiants dans le domaine.

Toujours dans l'optique d'enrichir la base avec des taxons qui présenteraient un intérêt écologique pour la zone d'étude, des xylothèques européennes possédant des bois d'Afrique australe ont également été consultés, tels que la xylothèque du CIRAD (Unité de Recherche BioWooEB à Montpellier), ainsi que la collection de charbons de référence de Namibie (Eichhorn 2002) et des bois tropicaux d'Afrique du département d'archéobotanique africaniste de l'Université de Goethe à Francfort. Les taxons présents en Afrique australe issus de ces collections seront intégrés par la suite dans SACHA pour compléter le corpus des référentiels de la région.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une recherche doctorale sous la supervision d'Isabelle Théry-Parisot et de Marion Bamford. Les visites des différentes xylothèques ont été rendu possible grâce à une aide à la mobilité pour la mise en place de nouvelles collaborations financée par l'Académie 5 et l'école doctorale Sciences Humaine Art et Littérature de l'université Côte d'Azur ainsi que par l'IfAS Research de Johannesburg. Je remercie May Murungi, Prosper Bende, Kevin Balkwill et Renee Reddy pour leur aide technique concernant l'échantillonnage, le processus de combustion et l'identification taxinomique des échantillons botaniques modernes collectés. Je remercie également Patrick Langbour pour son accueil à la xylothèque du CIRAD de Montpellier et ses dons précieux d'ouvrages d'anatomie du bois. Je remercie Katerina Neumann et Alexa Höhn pour leur accueil à l'université de Goethe et leur expertise, ainsi que Stéphanie Bodin pour ses conseils d'utilisation de la plateforme Xper³.

Enfin, je remercie François Orange du CCMA pour m'avoir formé à l'acquisition d'images au MEB et m'avoir assisté pendant les séances.

Références

Allott L.F. (2006) Archaeological charcoal as a window on palaeovegetation and wood-use during the Middle Stone Age at Sibudu Cave. *Southern African Humanities*, 18(1), 173-201.

AnatomIA (2021-onwards) <https://mediasrv.cepam.cnrs.fr>

Asouti E., Austin P. (2005) Reconstructing woodland vegetation and its exploitation by past societies, based on the analysis and interpretation of archaeological wood charcoal macro-remains. *Environmental Archaeology*, 10(1), 1-18.

Bodin S.C., Scheel-Ybert R., Beauchêne J., Molino J.F., Bremond L. (2019) CharKey: An electronic identification key for wood charcoals of French Guiana. *IAWA journal*, 40(1), 75-82.

Chikumbirike J., Bamford M.K. (2021) A Southern African Perspective on the Contribution of Charcoal Analyses to Archaeology. In *Oxford Research Encyclopedia of Anthropology*.

Deacon H.J., Deacon J., Scholtz A., Thackeray J.F., Brink J.S., Vogel J.C. (1984) Correlation of palaeoenvironmental data from the Late Pleistocene and Holocene deposits at Boomplaas Cave, southern Cape. In *Late Cainozoic palaeoclimates of the Southern Hemisphere*. International symposium held by the South African Society for Quaternary Research; Swaziland (pp. 339-351).

Eichhorn B. (2002) *Anthrakologische Untersuchungen zur Vegetationsgeschichte des Kaokolandes, Nordwest-Namibia* (Doctoral dissertation, Universität zu Köln).

Höhn A., Neumann K. (2018) Charcoal identification in a species-rich environment: The example of Dibamba, Cameroon. *IAWA Journal* 39, 87-94.

Hubau W., Van den Bulcke J., Kitin P., Mees F., Van Acker J., Beeckman, H. (2012) Charcoal identification in species-rich biomes: A protocol for Central Africa optimised for the Mayumbe forest. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 171, 164-178.

IAWA Committee, Wheeler E.A., Baas P., Gasson P.E. (1989) IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bull.* n.s. 10, 219-332.

InsideWood (2004-onwards) Published on the Internet. <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search> (10.9.2023).

Kabukcu C., Chabal L. (2021) Sampling and quantitative analysis methods in anthracology from archaeological contexts: Achievements and prospects. *Quaternary International*, 593, 6-18.

Kerner A., Bouquin S., Portier R., Vignes Lebbe R. (2021) The 8 Years of Existence of Xper3: State of the art and future developments of the platform. *Biodiversity Information Science and Standards* 5: e74250.

Leney L., Casteel R.W. (1975) Simplified procedure for examining charcoal specimens for identification. *Journal of Archaeological Science* 2, 153-159. doi:10.1016/0305-4403(75)90035-7

Mentzer S.M. (2014) Microarchaeological Approaches to the Identification and Interpretation of Combustion Features in Prehistoric Archaeological Sites. *J Archaeol Method Theory*, 21, 616-668.

- Mucina L., Rutherford M.C. (2006) The vegetation of South Africa, Lesotho and Swaziland. South African National Biodiversity Institute.
- Neumann K., Schoch W., Detienne P., Schweingruber F.H. (2001) Woods of the Sahara and the Sahel/Bois du Sahara et du Sahel/Hölzer der Sahara und des Sahel. Haupt, Bern.
- Puech E., Bamford M., Porraz G., Val A., Théry-Parisot I. (2021) Evaluating sampling methods in charcoal-rich layers and high diversity environment: A case study from the Later Stone Age of Bushman Rock Shelter, South Africa. *Quaternary International, Anthracology: Charcoal Science in Archaeology and Palaeoecology* 593–594, 36–49.
- Scheel-Ybert R. (2012) Anthrakos: an internet-accessible computer-aided key for charcoal identification
- Scheel-Ybert R. (2023) The new Anthrakos : an old database with a new identification system for anthracological research. presented at the International Anthracology Meeting. Porto. 28 August
- Schmidt E., Lotter M., McClelland W. (2002) Trees and Shrubs of Mpumalanga and Kruger National Park. Jacana Media.
- Stockton E.D. (1981) Reflections around the campfire. *Artefact (The)* Melbourne, 6, 3- 16.
- Thuiller W., Midgley G.F., Rougeti M., Cowling R.M. (2006) Predicting patterns of plant species richness in megadiverse South Africa. *Ecography* 29, 733–744.
- Ung V., Dubus G., Zaragüeta-Bagils R., Vignes-Lebbe R. (2010) Xper2: introducing e-taxonomy. *Bioinformatics*, 26(5), 703-704.
- Van Wyk B. (2013) Field guide to trees of southern Africa. Penguin Random House South Africa.
- Wheeler E.A. (2011) InsideWood - a web resource for hardwood anatomy. *IAWA Journal* 32 (2): 199-211.
- Wadley L. (2013) Recognizing complex cognition through innovative technology in Stone Age and Palaeolithic sites. *Cambridge Archaeological Journal*, 23(2), 163-183.
- Wurz S. (2019) Human Evolution, Archaeology and the South African Stone Age Landscape During the Last 100,000 Years, in: Knight, J., Rogerson, C.M. (Eds.), *The Geography of South Africa : Contemporary Changes and New Directions*, World Regional Geography Book Series. Springer International Publishing, Cham, pp. 125–132.

Mechanical properties of epoxidized oil heat treated Eucalyptus wood

HEJAZI Seyed Javad¹, ABEDINI Raoufeh², GHORBANI Maryam³,
DASTOORIAN Foroogh⁴

¹MSc. Graduate from Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

^{2,4}Assistant Professor in Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

³ Professor in Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

abedini_rf@sanru.ac.ir

Keywords: epoxidized soybean oil; mechanical properties; bending strength; oil heat treatment; weight percent gain

Context and objective

Wood thermal modification is one of the environmentally friendly methods to increase treated samples durability, service life and safety for burning after their service life (Nejad et al. 2019). Thermal modification of wood has been developed since the beginning of the 20th century by proving the effect of high temperature on improving dimensional stability and natural durability of wood (Sandberg et al. 2017).

The basis of thermal modification methods is the chemical change of wood under high temperature. Thermal modification occurs between 180 and 260 °C, because lower temperatures do not significantly affect wood components, and temperatures above 260 °C cause undesirable degradation (Hill 2006, Lee et al. 2018).

Improving physical properties and increasing resistance against biotic destructive factors are benefits of thermal modification, while reducing mechanical properties is one of its disadvantages (Hill 2006, Lee et al. 2018). Thermal modification take place in different mediums such as steam, Nitrogen and hot oils which results in wood with different properties. Oil heat treatment process is based on the simple method of heating wood in vegetable oils. Since the boiling point of many vegetable oils is higher than the temperature required for heat treatment of wood, thermal modification in hot oil bath is a practical option (Sandberg et al. 2017). Oil heat treatment increase hydrophobicity with two mechanisms: hydrophobing wood cell wall because of presence of non-polar oil and modifying chemical structure of wood, reduction of moisture absorption capacity by degradation of hemicellulose at high temperature. But there is no reaction between the oil and wood cell wall. However functionalized vegetable oils are able to bond with cell wall through functional groups such as epoxy. In this way other than physical properties, mechanical properties may enhance (Tjeerdsma et al. 2005, Ghasemi et al. 2023). Eucalyptus wood as a fast-growing planting species with high density can grow and adapt to different part of Iran. As thermal modification mostly accompanied with mass loss, Eucalyptus wood with high density is suitable for thermal modification. This study investigated effect of oil heat treatment with crude and epoxidized soybean oil on weight gain and mechanical properties of Eucalyptus wood.

Material and Methods

Eucalyptus logs with approximate diameter of 40 cm and a length of 200 cm were first cut into 3 cm thick lumbers and after drying outdoor, they were cut to standards size for mechanical tests according to ASTM-D143-94. The samples were dried in an oven at a temperature of 103

°C for 24 hours. Two types of crude soybean oil and epoxy soybean oil were obtained from Sepahan Fanavran Shimi Company.

The dried samples were immersed in oils and heat treated in an oven at 150, 175 and 200 °C for 4 hours. Different treatments and brief cod of sample is shown in Tab. 1.

Tab. 1: treatments and brief cod of sample

| Temperature (°C) | 150 | 175 | 200 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Crude soybean oil | SO150 | SO175 | SO200 |
| Epoxy soybean oil | ESO150 | ESO175 | ESO200 |

Properties of modified samples were evaluated according to equation 1 to 3. For weight percent gain:

$$WPG = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

WPG: weight gain (%), W1: dried weight before modification (g), W2: dried weight after modification (g)

To determine the bending strength, samples were tested in the SANTAM STM-20 machine with a deflection rate of 1.3 mm/min. Modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) were calculated according to equations 2 and 3 respectively:

$$MOR = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

MOR: modulus of rupture, P: maximum load, L: span length (mm), h: sample thickness (mm), b: sample width (mm).

$$MOE = \frac{P_L L^3}{4bh^3 \delta_L} \quad (3)$$

MOE: modulus of elasticity (MPa), PL: load at proportional limit (N), b: samples width, L: span length (mm), δ_L : deflection at proportional limit.

Hardness of the samples was conducted according to ASTM D143 using the SANTAM STM-20 machine by a steel ball with diameter of 11.3 mm at speed of 6 mm/min on the tangential surface to measure impact resistance, samples were tested in SANTAM SIT-100 Pendulum Impact Tester machine according to ASTM-D143 standard.

Results and discussion

Density and Weight percent gain (WPG) after oil heat treatment

The highest density after thermal modification was related to crude oil at 150 °C in both oils and crude soybean oil at 175 °C (Fig. 1). With increasing temperature the density decreased and the lowest density observed in sample modified at 200 °C with epoxy soybean oil. Research has reported that hydrothermal modification decreased the dry density of samples and some reports no significant change after hot oil modification (Abde et al. 2014, Yang and Jin 2021). In oil heat treatment, part of the oil penetrates into the wood and increases the weight of the sample and compensate mass loss caused by the destruction of the cell wall in high temperature around 175°C.

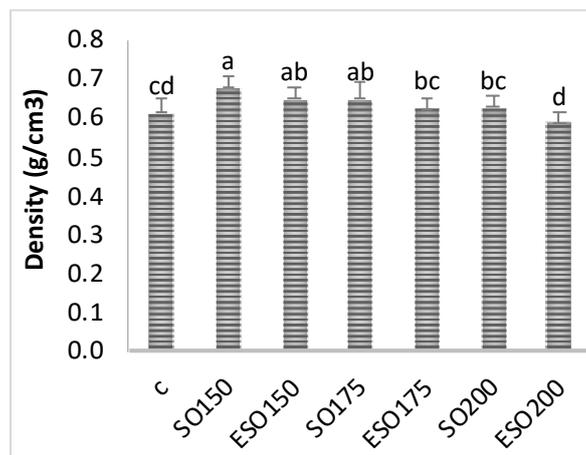


Fig. 1: Density of control (c) and modified samples

Temperature had significant effect on weight percent gain (WPG). WPG decreased with increasing temperature. Reduction of WPG was more severe in samples modified with epoxidized soybean oil, so that samples modified in epoxidized soybean oil showed mass loss which illustrated with negative WPG in Fig. 2. Increase in weight caused by penetration of crude oil into the wood structure is more than that of epoxidized soybean oil. Probably, higher molecular weight of epoxidized oil prevented penetration of epoxy soybean oil into the wood structure which could compensate mass loss caused by the destruction of the wall. In 200 °C oil can not compensate mass loss occurred by destruction of wood component, especially in epoxy oil; because epoxy oil penetration is less than crude oil. Therefore, WPG increase in SO150, ESO150 and SO175, and decreased in ESO175, SO200 and became negative in ESO200.

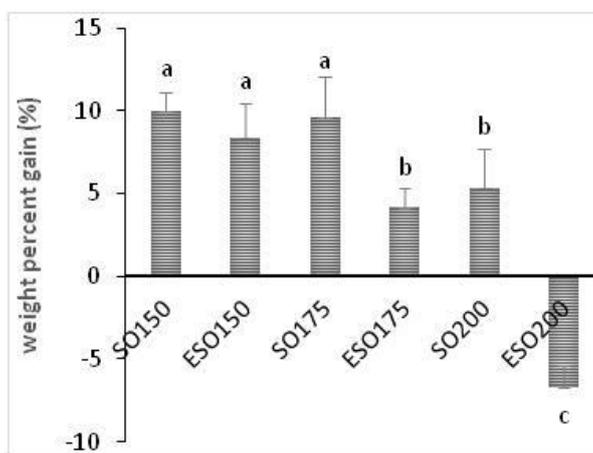


Fig. 2: Weight percent gain of control (c) and modified samples

Mechanical properties of modified wood

Module of Elasticity (MOE) and Module of Rupture (MOR)

The results showed that thermal modification in crude soybean oil at 150 °C did not cause significant change in modulus of rupture compared to the control sample. At this temperature, lignin condensation can prevent decrease of mechanical resistances, including bending and hardness strength (Abde et al. 2014).

Bending resistance decreased with the increase of heat treatment temperature. The lowest value of bending strength was reported at 200°C. However, with increase of temperature, the bending strength decreased significantly, which has been reported in other researches (Baar et al. 2020).

Comparison between two types of oil, at 150 °C, showed that the modulus of rupture of sample modified in epoxy soybean oil was significantly lower than the sample modified in crude oil. This decrease was also observed at higher temperatures, but the difference was not significant (Fig. 3). Modification with epoxy soybean oil due to the presence of epoxy functional groups that can penetrate the cell wall, reduced the bending resistance, probably due to creating gap between the cellulose microfibrils of the wall (Ghasemi et al. 2023).

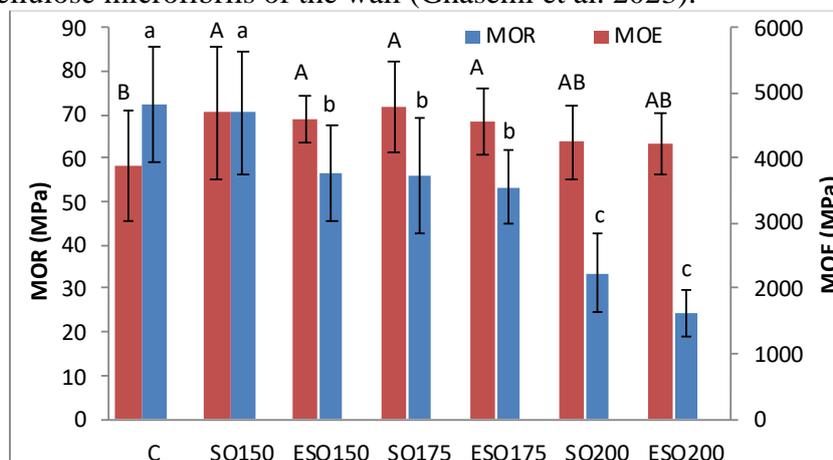


Fig. 3. MOE and MOR of control and modified Eucalyptus wood

Oil heat treatment increased MOE; however there was no significant difference among modified samples treated in different oils and temperatures. At higher temperature, degradation of cell wall polymers and shortening of cellulose chain length are the reasons for MOR and MOE reduction (Abde et al. 2014). Slight increase in MOE under milder treatment temperature explained by degradation of amorphous cellulose content and increase in the relative crystallinity (Kocaefer et al. 2008, Lee et al. 2018). Transformation of the wood amorphous polymeric materials from glassy state to plastic state at the glass-transition temperature and the hydraulic effects of oil present in the cavities also reported to justify increment in flexural modulus (Megnien et al. 2002, Lee et al. 2018).

Effect of Modification on hardness

Fig. 4 illustrates effect of oil heat treatment on hardness. Hardness increased in samples modified at 150 °C in both types of oil. However it decreased with increasing temperature to 175 and 200 °C. Comparison between two types of oil illustrates that sample modified with epoxy soybean oil had a higher decrease in hardness, which difference was statistically significant in ESO200.

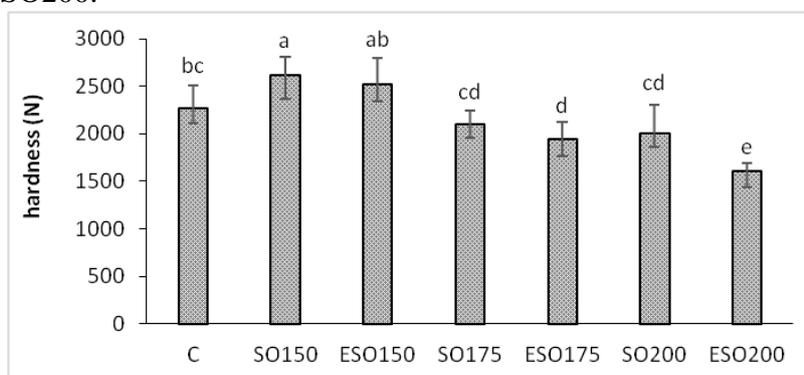


Fig 4. Hardness of control and oil heat treated samples

Oil heat treatment at 150 °C led to an increase in hardness in both types of oils. But increasing the temperature caused a decrease in hardness. The difference of hardness was not statistically

significant between samples modified in two different oils. The increase in surface hardness in heat treatment at lower temperature (around 150 °C), can occur as a result of lignin condensation and creation of new chemical bonds (Juizo et al. 2020). However, increasing the heat treatment temperature caused a decrease in hardness due to the destruction of the components of the cell wall (Ghasemi et al. 2023, Fang et al. 2012).

Effect of modification on impact bending

The results showed that thermal modification caused a significant and severe reduction in impact bending resistance (Fig. 5). The untreated control sample had the highest impact resistance. The impact bending resistance decreased as the temperature increased. Modified samples in epoxy soybean oil at 150 and 175 °C had more impact resistance. This increase was significant in ESO150. There was no significant difference between the impact resistances of modified wood in two types of oil at a temperature of 200 °C.

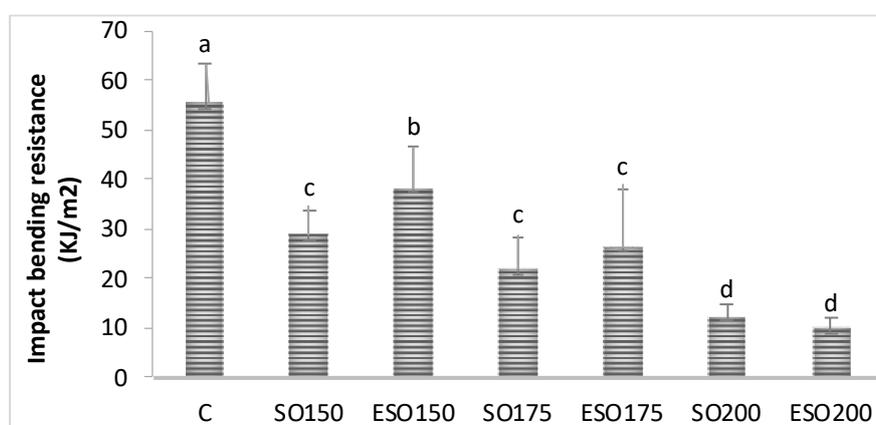


Fig. 5. Impact bending resistance of control and modified samples

Destroying the components of the cell wall during heat treatment led to brittleness of wood. High treatment temperature increases the intensity of the wall destruction led to decrease of impact bending resistance (Yang and Jin, 2021). In comparison between the two types of oil, samples modified in epoxy soybean oil with temperatures of 150 and 175 °C had higher impact resistance than the samples modified with crude oil. Ghasemi et al. (2023) and Terziev and Panov (2010) also reported an increase in the impact resistance of wood saturated with epoxy oil compared to crude oil. Impregnation of wood with epoxy oil due to the ability of oil to penetrate the cell wall and the placement of long chains of oil between cellulose microfibrils caused the weakening of the bond between the components of the cell wall and increased flexibility and as a result increased impact resistance (Ghasemi et al. 2023). However, increasing the modification temperature to 200°C increased the rigidity of the cell wall and as a result reduced flexibility and subsequently reduced impact resistance due to the formation of cross linkage.

Conclusion

In general there were not significant differences between bending resistance and hardness of samples modified in two kinds of oils. Except for sample modified in epoxy oil at 150°C, which showed significant reduction in bending resistance compare to SO150. Oil heat treatment decreased bending resistance. However hardness increased at 150°C and then decreased with increasing temperature. Oil heat treatment caused a sharp reduction in impact bending resistance. The impact resistance of the samples modified in epoxy oil at 150°C was higher than the samples modified in the crude oil.

References

Fang CH, Cloutier A, Blanchet P, Koubae A (2012) Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment Part 2: Hygroscopicity and mechanical properties, *Bioresources*, 6(1): 925-935.

Ghasemi M, Dastoorian F, Abedini R, Amininasab M (2023) Effect of Combined Heat Treatment/Densification on Mechanical Properties of Poplar Wood Impregnated with epoxidized soybean oil, *Journal of wood and forest science and technology* 30(2):137-125 (in Persian).

Juizo CGF, Pereira da Rocha M, Nogueira Xavier C, Moreira Moraes A, Bezerra de Oliveira M, Moreira da Silva JR, (2020) Thermal Modification Of Eucalyptus Wood And Use For Floors Of Low Traffic Environment. *FLORESTA*, Curitiba, 51(2):457-465.

Kocaef D, Poncsak S, Boluk Y, (2008) Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen, *BioResources*, 3: 517–537.

Lee SH, Ashaari Z, Lum WCH, Halip JA, Ang AF, Tan LP, Chin KL, Tahir PM, Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, 2018. *Construction and Building Materials*, 181: 408–419.

Megnis M, Olsson T, Varna J, Lindberg H, (2002) Mechanical performance of linseed oil impregnated pine as correlated to the take-up level, *Wood Science Technology*, 36: 1–18.

Nejad M, Dadbin M, Cooper, P, (2019) Coating performance on exterior oil-heat treated wood. *Coatings*, 9(4): 225.

Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G, (2017) Wood modification technologies - a review, *iForest biogeosciences and Forestry*, 10: 895-908.

Terziev N, Panov D (2010) Plant Oils As “Green” substances for wood protection. In: 4th international conference on environmentally compatible forest products, At Porto, Portugal, p. 143–149.

Tjeerdsma BF, Swager P, Horstman B, Holleboom W, Homan J (2005) Process development of treatment of wood with modified hot oil, *European Conference on Wood Modification*, Göttingen, Germany, p. 1-10.

Yang L, Jin H, (2021) Effect of Heat Treatment on the Physic-Mechanical Characteristics of *Eucalyptusurophylla* S.T. Blake, *Materials*, 14(21):6643.

Etude du vieillissement de contreplaqués collés par résines thermoplastiques et renforcés par fibres naturelles

PRUNIER Clément¹, ROUSSEAU Jérôme¹, BUTAUD Pauline², JEANNIN Thomas³,
PLACET Vincent³

¹Laboratoire DRIVE, Université de Bourgogne, 49, rue Mademoiselle Bourgeois, BP 31
58027 Nevers, clement.prunier@u-bourgogne.fr, jerome.rousseau@u-bourgogne.fr

²Institut FEMTO-ST, SUPMICROTECH, Université de Franche-Comté, CNRS, F-25000
Besançon, France, pauline.butaud@univ-fcomte.fr

³Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, CNRS, F-25000 Besançon, France
thomas.jeannin@femto-st.fr, vincent.placet@univ-fcomte.fr

Mots clefs : Vieillissement, contreplaqués, fibres naturelles, thermoplastiques, cisaillement interlaminaire

Contexte et objectifs

La plupart des contreplaqués industriels classiques utilisent des colles pétrosourcées non recyclables et à base de formaldéhyde, un composé nocif pour la santé et possédant un impact carbone non négligeable. Il est donc nécessaire de proposer des alternatives non-toxiques, à faible empreinte environnementale et permettant de s'inscrire dans une logique de circularité (matériaux biosourcés, recyclés et recyclables). Parmi elles, les résines thermoplastiques ont montré des résultats très prometteurs sur le plan de la résistance au cisaillement interlaminaire, en permettant parfois d'obtenir des résultats supérieurs à celles des colles traditionnelles (Grigsby et al. 2020; Kajaks et al. 2009).

L'ajout de fibres aux interfaces entre placages est une solution permettant d'améliorer les performances à l'interface des contreplaqués. En fonction de l'adhésif utilisé, l'ajout de fibres naturelles de lin ou de cellulose à l'interface peut améliorer la résistance au cisaillement interlaminaire (Jorda et al. 2021).

Quelle que soit la modification de la composition de l'interface des contreplaqués, il est nécessaire d'étudier l'évolution de leurs propriétés dans le temps et dans différentes conditions hygrothermiques, afin de pouvoir définir leur classe d'application (Grigsby et al. 2020; Kajaks et al. 2009). L'effet de la présence de fibres à l'interface entre placages sur le comportement en vieillissement du contreplaqué n'a pas encore été étudié. Cependant, certaines études se plaçant à l'échelle du composite montrent que les composites utilisant des fibres naturelles comme renforts subissent une dégradation importante de leurs propriétés mécaniques après avoir subi un processus de vieillissement accéléré (Assarar et al. 2011).

Dans cette étude, le vieillissement de contreplaqués collés par résines thermoplastiques (polypropylène recyclé greffé anhydride maléique (rPPAM) et résine d'acide polylactique (PLA), avec présence ou non de renforts en fibres unidirectionnelles de lin à l'interface, est étudié. Les performances de l'interface et leur évolution sont évaluées à l'aide d'un essai de résistance au cisaillement interlaminaire (notée ILSS pour Interlaminar Shear Strength), selon la norme EN302.

Matériel et méthodes

La résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS) est mesurée par un essai de traction sur une éprouvette entaillée d'une largeur de 3 mm de chaque côté jusqu'à l'interface entre les placages

centraux, créant une surface sollicitée en cisaillement (Fig. 1). Les placages sont constitués de placages de hêtre ou de douglas, respectivement originaires de la région Centre-Val de Loire et Bourgogne-Franche-Comté, avec une épaisseur de respectivement 2 mm et 3 mm. Ils ont été fournis et déroulés par le LaBoMaP, Cluny. Les contreplaqués sont constitués de 6 plis de placages d'une même essence, avec une stratification à [0/90/0/0/90/0], 0° représentant le sens longitudinal du placage et le sens de l'essai (flèches rouges sur la Fig. 1). Les adhésifs étudiés sont une résine de polypropylène recyclée (rPPAM) et fournie par la société Adivalor, mélangé à 5% en masse à un polypropylène greffé à 1% en masse d'anhydride maléique (Polybond 3200®) fourni par la société Brenntag, ainsi qu'une résine PLA (PLE 005®), fournie par la société NaturePlast. Ils ont été mis en forme sous forme de films par extrusion calandrage. Les films ont une épaisseur de 80 µm pour le rPPAM et 100 µm pour le PLA. Lors de la fabrication, deux films de l'adhésif étudié sont placés entre chaque placage. Lorsque l'effet de la présence de renforts fibrés est étudié, des fibres unidirectionnelles de lin (FlaxTape®), avec une densité surfacique de 110g/m² et fournies par la société Linéo, sont placées à l'interface entre les deux placages centraux, à 0°. L'assemblage se fait ensuite sous une presse de thermocompression, suivant un cycle de fabrication consistant en une montée en température à 15°C/min jusqu'à 180°C, suivi d'une application de pression de 1 MPa pendant 34 min à 66 min en fonction de l'épaisseur de placages, puis d'une redescente en température contrôlée à 20°C/min. Une fois le contreplaqué fabriqué, celui-ci est découpé en 7 éprouvettes selon la norme EN302, puis les éprouvettes sont conditionnées pendant au moins 72h en enceinte climatique à 50% d'humidité relative et 23°C.

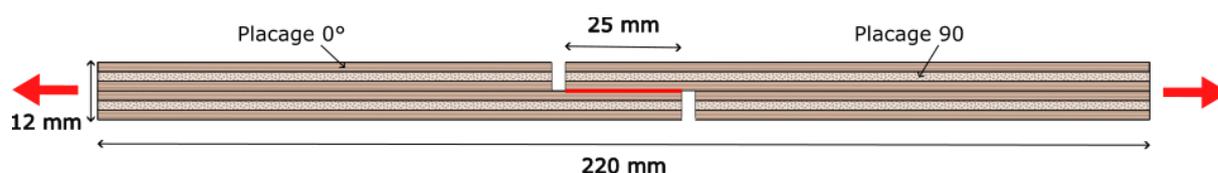


Fig. 1: Représentation schématique d'une éprouvette de hêtre pour un essai de cisaillement interlaminaire

Deux processus de vieillissement accéléré sont étudiés. Le premier processus (noté Ag1) consiste en un conditionnement de 40 jours dans une enceinte climatique à 90 % d'humidité relative et 40°C (Fig. 2a). Le deuxième processus (noté Ag2) consiste en une immersion des éprouvettes en eau bouillante pendant 6h (Fig. 2b). Dans les deux cas, les éprouvettes sont ensuite reconditionnées en enceinte climatique à 50% RH et 23°C jusqu'à ce qu'elles soient revenues à une teneur en eau d'équilibre, avant d'être testées en cisaillement.

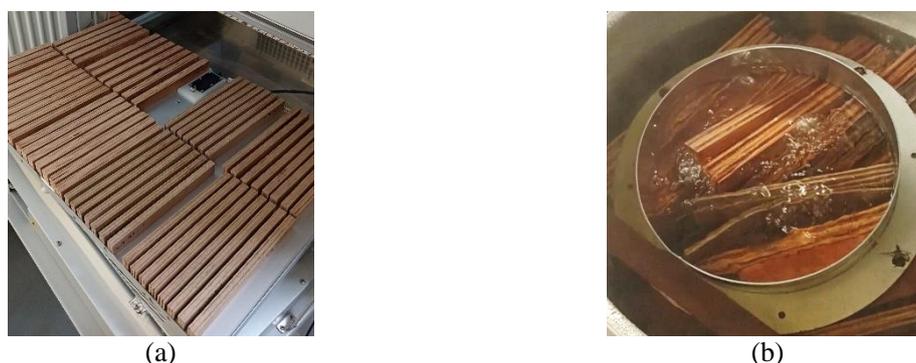


Fig. 2: Procédures de vieillissement des éprouvettes :
(a) En enceinte climatique à 40°C 90% RH (Ag1) ; (b) Par immersion en eau bouillante (Ag2)

Résultats et discussion

Les résultats obtenus pour les éprouvettes ayant subi le processus de vieillissement Ag1 sont présentés en Fig. 3. Les éprouvettes collées au rPPAM non renforcées (sans fibres) (Fig. 3a et

3c, barres sans rayure) montrent une très bonne résistance au vieillissement, ainsi qu'une augmentation significative de la valeur d'ILSS après vieillissement pour les éprouvettes de hêtre (Fig 3a). Les éprouvettes de hêtre collées au PLA (Fig 3b) montrent une dégradation de l'ordre de 15% après Ag1. Les éprouvettes de douglas collées au rPPAM ou au PLA ne montrent pas de modification significative de leur valeur d'ILSS lors du vieillissement. Concernant les contreplaqués renforcés, le processus de vieillissement accéléré cause une dégradation significative de la valeur d'ILSS dans toutes les configurations (à l'exception des éprouvettes de douglas collé au rPPAM). Ce phénomène est expliqué par Ghasemzadeh-Barvarz et al. (2015) comme étant dû à des décohésions fibres/matrices apparaissant suite au gonflement et dégonflement des fibres causé par les phénomènes de sorption/désorption lors de la prise d'humidité des fibres.

Les mêmes phénomènes ont été observés sur les éprouvettes collées au MAPP ayant subi le vieillissement accéléré Ag2. Les éprouvettes de PLA se sont entièrement délaminées après Ag2 du fait de la dégradation par hydrolyse de la résine.

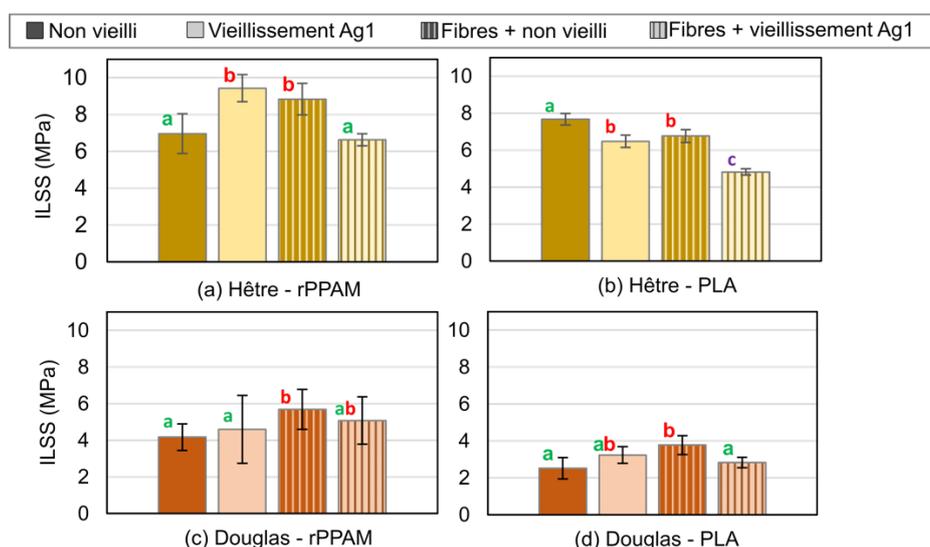


Fig. 3 : Résistance au cisaillement interlaminaire des contreplaqués de Hêtre (a, b) et Douglas (c,d) collés avec rPPAM et PLA, avec et sans renfort de lin, avant et après vieillissement Ag1

Conclusion et perspectives

Les contreplaqués collés au rPPAM ont une très bonne résistance au vieillissement accéléré, ils ne montrent aucune perte significative de résistance au cisaillement interlaminaire. Le rPPAM est donc un adhésif viable pour réaliser des contreplaqués utilisés en conditions hygrothermiques sévères. Le PLA est bien plus sensible aux conditions hygrothermiques, son application devrait donc se limiter à des atmosphères sèches et en intérieur. Le fait que ces deux adhésifs possèdent un impact carbone plus faible que les colles traditionnelles dû à leur origine recyclée ou biosourcée en font des alternatives intéressantes à approfondir. Le renforcement par ajout de fibres naturelles s'est montré défavorable à la résistance au vieillissement des contreplaqués. Il est donc à éviter dans le cas d'applications dans des conditions à fort taux d'humidité.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme « Investissements d'Avenir », projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-0003) dans le cadre du projet WooFHi.

Références

Assarar M., Scida D., El Mahi A., Poilâne C., Ayad R. (2011) Influence of Water Ageing on Mechanical Properties and Damage Events of Two Reinforced Composite Materials: Flax–Fibres and Glass–Fibres. *Materials & Design* 32(2): 788–95.

Ghasemzadeh-Barvarz M., Duchesne C., Rodrigue C. (2015) Mechanical, Water Absorption, and Aging Properties of Polypropylene/Flax/Glass Fiber Hybrid Composites'. *Journal of Composite Materials* 49(30): 3781–98.

Grigsby W.J., Puri, A., Gaugler M., Lüedtke J., Krause A. (2020) Bonding Wood Veneer with Biobased Poly(Lactic Acid) Thermoplastic Polyesters: Potential Applications for Consolidated Wood Veneer and Overlay Products. *Fibers* 8(8): 50.

Jorda J., Kain G., Barbu M.-C., Petutschnigg A., Král P. (2021) Influence of Adhesive Systems on the Mechanical and Physical Properties of Flax Fiber Reinforced Beech Plywood'. *Polymers* 13(18): 3086.

Kajaks J.A. Bakradze G.G., Viksne A.V., Reihmane S.A., Kalnins M.M., Krutohvostov R. (2009) The Use of Polyolefins-Based Hot Melts for Wood Bonding. *Mechanics of Composite Materials* 45(6): 643–50.

Modélisation de l'effet trachéide

BOIVIN Juliette¹, FROEHLI Luc², GIRARDON Stéphane¹, TEYSSIEUX Damien²,
DENAUD Louis¹

¹Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

Juliette.Boivin@ensam.eu, Louis.Denaud@ensam.eu, Stephane.Girardon@ensam.eu

²Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies (FEMTO – ST) – UMR 6174

Luc.Froehly@univ-fcomte.fr, Damien.Teyssieux@femto-st.fr

Mots clés : optique, effet trachéide, diffusion de la lumière

Contexte et objectifs

Le contrôle non destructif du bois permet de mieux connaître ses propriétés et ainsi le valoriser au mieux. On peut par exemple mesurer la densité locale, le taux d'humidité et les propriétés chimiques du bois grâce à différentes technologies comme les rayons X (Wei 2011), ou la spectroscopie proche infrarouge (Tsuchikawa 2015). Parmi les propriétés importantes à connaître, on trouve également l'orientation des fibres du bois. Celle-ci peut être mesurée localement à l'aide de l'effet trachéide, qui désigne la diffusion anisotrope de la lumière dans et à la surface du matériau bois (Fig. 1). Cet effet est déjà utilisé pour mesurer l'orientation de fibres à la surface du bois et ainsi en estimer les propriétés mécaniques (Hankinson 1921).

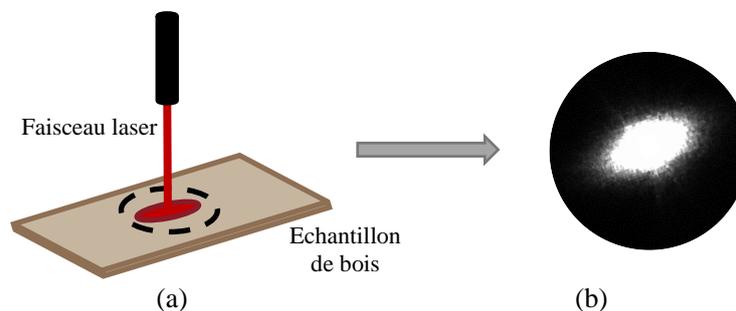


Fig. 1 : (a) Schéma de la projection d'un laser sur du bois (b) Image de la surface du bois sur laquelle on voit l'ellipse lumineuse obtenue par effet trachéide

Ce phénomène est simple à mettre en œuvre mais est influencé par de nombreux facteurs de variation dépendants de la microstructure du bois que l'on souhaite caractériser ou de la source utilisée. Purba et al. (2020) ont par exemple montré que l'aspect des ellipses obtenues (notamment l'aire) variait selon l'essence utilisée et les conditions d'humidité de l'échantillon (Fig. 2). L'utilisation de la simple information de la valeur de l'angle de l'ellipse surfacique est déjà très riche. Elle a permis à de nombreux auteurs de détecter les nœuds ou de prédire les performances mécaniques de l'échantillon caractérisé (Jolma et al. 2008, Brännström et al. 2008). Peu d'auteurs ont cherché à exploiter d'autres paramètres liés au phénomène lui-même car les facteurs d'influence sont nombreux et difficiles à séparer.

L'exploitation de l'ellipse obtenue dépend donc des paramètres de sa formation, et plus les facteurs exerçant une influence dessus seront identifiés plus l'ellipse sera exploitable pour un traitement numérique permettant de relier ses propriétés à des propriétés physiques ou structurelles du bois.

Le projet présenté par la suite consiste à modéliser l'effet trachéide afin de mieux comprendre le rôle des différents facteurs sur le phénomène de diffusion dans le but d'en déduire d'autres informations sur le bois que l'orientation des fibres.

Matériel et méthodes

Afin de réaliser des simulations de trajectoires lumineuses, le logiciel OpticStudio a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel permettant de faire de la conception et de l'analyse de systèmes optiques.

Le bois a été représenté à l'aide de deux structures :

- Une structure théorique composée d'une matrice de fibres plus ou moins espacées, et dotées de propriétés de diffusion et d'absorption différentes. Cette structure possède l'avantage de contrôler et faire varier facilement les paramètres de la matrice (taille des fibres, espacement, taille de la matrice, forme des fibres...) en se basant sur des données déjà existantes (Ban et al. 2018) (Fig. 2a)
- Une structure réalisée à partir de photographies de coupes de microscope de différentes essences qui sont ensuite extrudées. Avec ce mode opératoire, le modèle est plus proche de la réalité mais on ne dispose que d'un contrôle réduit sur la structure du bois (Fig. 2b)

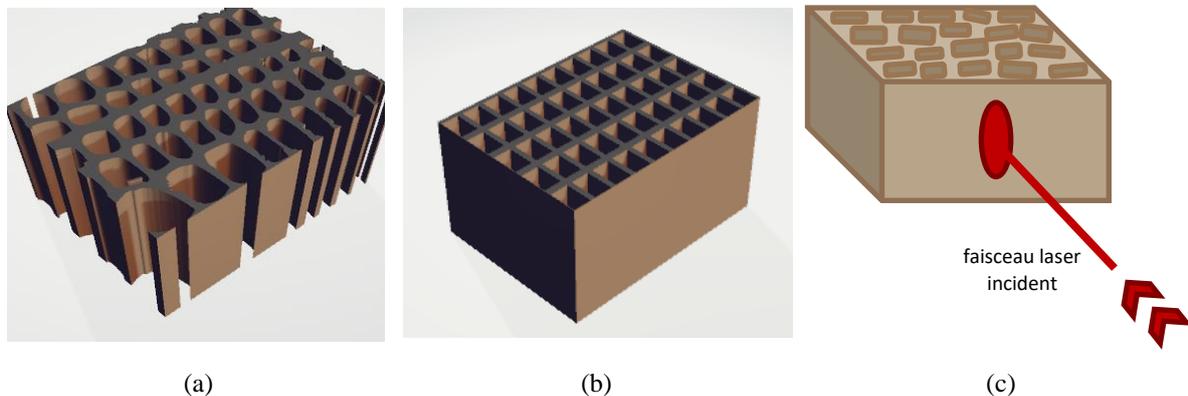


Fig. 2 : (a) Coupe microscopique de douglas extrudée (b) Matrice théorique extrudée (c) Représentation schématique du faisceau laser incident

Le logiciel OpticStudio permet de placer des détecteurs décomptant les rayons lumineux les traversant. Ils sont placés à la surface et à l'intérieur du bois afin de cartographier le parcours des rayons au sein du bois.

On se place dans un modèle de diffusion Henyey-Greenstein, car l'absorption du bois est négligeable par rapport à la diffusion (D'andrea et al. 2008).

Dans le modèle développé, les éléments composant le bois sont considérés comme homogènes et sont caractérisés par deux coefficients : le chemin de libre parcours moyen (CLPM), qui représente la distance parcourue par un photon avant de rencontrer un obstacle, et la transmission, qui varie selon la capacité du matériau à absorber de la lumière. Ces deux paramètres sont définis comme suit :

$$CLPM = \frac{1}{\mu_a + \mu_s} \quad (1)$$

$$Transmission = \frac{\mu_s}{\mu_a + \mu_s} \quad (2)$$

où μ_a et μ_s sont respectivement le coefficient d'absorption et de diffusion du bois. Ceux-ci ont été déterminés dans des études précédentes, dans différents types de bois à l'aide de méthodes variées (Konagaya et al. 2016, Kitamura et al. 2016). Ces coefficients issus de la littérature servent dans un premier temps à calibrer le modèle.

Résultats et discussions / Premiers résultats

Les premières simulations ont été menées à l'aide du bois « théorique » (Fig. 3). Celles-ci ont donné des résultats en adéquation avec la diffusion mesurée de la lumière dans le matériau bois car elles font apparaître un effet trachéide. Les simulations mettent également en avant un effet trachéide plus marqué sur du bois type résineux (fibres parallélépipédiques) que sur du bois type feuillus (fibres cylindriques), en concordance avec les constats empiriques.

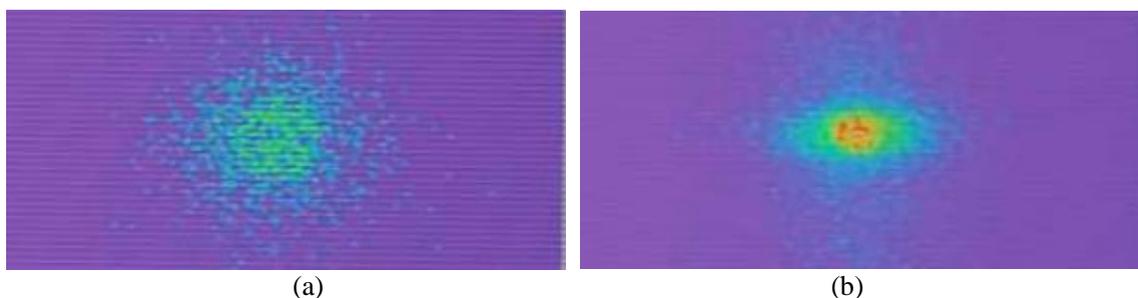


Fig 3 : Effet trachéide obtenu à la surface du bois « théorique » avec des fibres
(a) cylindriques (b) parallélépipédiques

Néanmoins, l'intérêt de l'utilisation de ce bois synthétique doté de fibres parallélépipédique est limité : sa forme trop parfaite et la présence de bords parfaits conduit à obtenir des effets qui n'existent pas dans la réalité.

Les études suivantes ont donc été menées sur des coupes de microscope extrudées afin de se rapprocher de la réalité (Fig. 4). Les ellipses obtenues par effet trachéide sont qualitativement proches de ce qui a déjà été réalisé dans la littérature (Kienle et al. 2008). Mais ils n'y correspondent pas quantitativement. Des ajustements dans le choix des facteurs donnés au modèle vont devoir être trouvés.

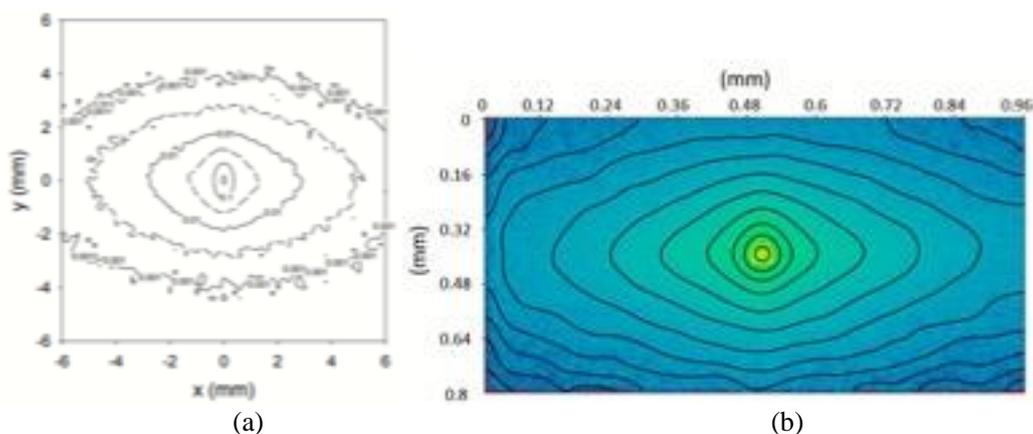


Fig. 4 : Effet trachéide : (a) simulé, obtenu par Kienle et al. (2008) ; (b) obtenu lors des simulations réalisées avec OpticStudio

Des simulations plus riches en informations vont être menées en prenant en compte la diffusion de la lumière dans l'épaisseur des éprouvettes virtuelles, comme sur la Fig. 5. Cela permettra de voir l'influence des éléments de la microstructure du bois sur cette diffusion.

Conclusion et perspectives

Le modèle développé permet de retrouver un effet trachéide qualitativement comparable à des modélisations précédemment effectuées. Il est donc prometteur mais nécessite des améliorations. A l'avenir, le but sera d'obtenir des résultats quantitatifs plus convaincants, en comparant des données expérimentales et simulées.

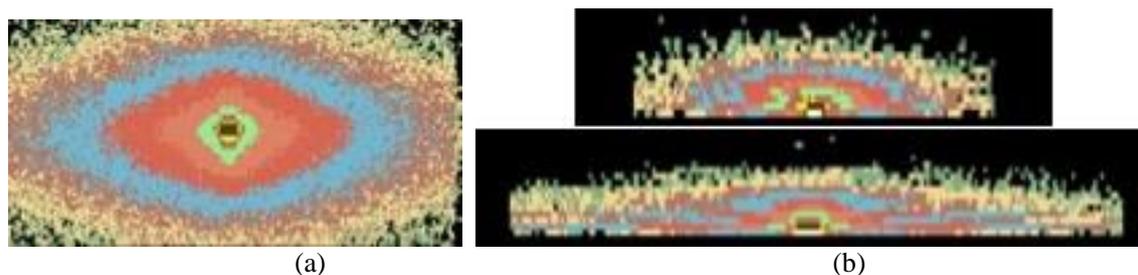


Fig. 5 : Effet trachéide obtenu (a) à la surface du bois et (b) en coupe dans l'épaisseur selon le grand axe et le petit axe

Remerciements

Ce travail est soutenu par le Conseil Régional Bourgogne-Franche-Comté.

Références

- Ban M., Inagaki T., Ma T., Tsuchikawa S. (2018) Effect of cellular structure on the optical properties of wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 53-60.
- Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J. (2020) Influence of wood anatomy on fiber orientation measurement obtained by laser scanning on five European species. *Journal of Wood Science*, 66(1), 74.
- Brännström M., Manninen J., Oja J. (2008) Predicting the strength of sawn wood by tracheid laser scattering. *BioResources*, 3(2), 437-451.
- D'andrea C., Farina A., Comelli D., Pifferi A., Taroni P., Valentini G., ... Kienle A. (2008) Time-resolved optical spectroscopy of wood. *Applied spectroscopy*, 62(5), 569-574.
- Hankinson R.L. (1921) Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. *Air service information circular*, 3(259), 130.
- Jolma I.P., Mäkyne A.J. (2008) The detection of knots in wood materials using the tracheid effect. In *Advanced Laser Technologies 2007* (Vol. 7022, pp. 143-151). SPIE.
- Kienle A., D'Andrea C., Foschum F., Taroni P., Pifferi A. (2008) Light propagation in dry and wet softwood. *Optics Express*, 16(13), 9895-9906.
- Kitamura R., Inagaki T., Tsuchikawa S. (2016) Determination of true optical absorption and scattering coefficient of wooden cell wall substance by time-of-flight near infrared spectroscopy. *Optics Express*, 24(4), 3999-4009.
- Konagaya K., Inagaki T., Kitamura R., Tsuchikawa S. (2016) Optical properties of drying wood studied by time-resolved near-infrared spectroscopy. *Optics Express*, 24(9), 9561-9573.
- Purba C.Y.C., Viguier J., Denaud L., Marcon B. (2020) Contactless moisture content measurement on green veneer based on laser light scattering patterns. *Wood Science and Technology*, 54(4), 891-906.
- Tsuchikawa S., Kobori H. (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61(3), 213-220.
- Wei Q., Leblon B., La Rocque A. (2011) On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. *Canadian journal of Forest Research*, 41(11), 2120-2140.

Quantification de la contrainte mécanique exercée par l'écorce sur le cambium en croissance

BOURSAT Thomas, ALMÉRAS Tancrede, BARÉS Jonathan, CLAIR Bruno

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier, CNRS,
Montpellier, France

thomas.boursat@umontpellier.fr, tancrede.almeras@umontpellier.fr,
jonathan.bares@umontpellier.fr, bruno.clair@cnr.fr

Mots clés : cambium ; croissance secondaire ; xylème ; phloème ; pression de turgescence ; propriétés mécaniques ; biomécanique

Contexte et objectifs

Les mécanismes de la croissance des cellules végétales sont globalement bien connus. Pour que la croissance puisse s'opérer, les cellules végétales doivent être turgescents. C'est-à-dire qu'une différence de potentiel hydrique entraîne l'eau à l'intérieur de la cellule et exerce une pression contre la paroi cellulaire. Cette pression permet à la cellule de se déformer donc de croître (Lockhart 1965). Bien que la croissance secondaire participe davantage au stockage du carbone que la croissance primaire, nos connaissances sur les mécanismes sous-jacents restent limitées (Kwiatowska et al. 2011). L'étude du cambium, méristème secondaire situé sous l'écorce, est plus compliquée du fait des difficultés d'accès pour l'observation et l'expérimentation. Le cambium produit à la fois les cellules du xylème et du phloème secondaire, respectivement le bois et l'écorce interne. Il est donc confiné entre deux tissus rigides (Kojs et al. 2023), ce qui n'est pas le cas pour les méristèmes primaires. Pour qu'il y ait une croissance, le cambium doit pousser contre l'écorce et la déformer plastiquement. En d'autres termes, la pression de turgescence au sein des cellules cambiales, doit être supérieure à la contrainte exercée par l'écorce. Pour apprécier le rôle des contraintes mécaniques dans la croissance cambiale, il faut donc évaluer ces deux paramètres. Dans cette étude, seule la contrainte exercée par l'écorce sera discutée.

L'écorce étant une couche relativement fine dont la surface externe est libre de contraintes, nous considérerons que la contrainte tangentielle σ_{TT} y est uniforme, si bien que la contrainte radiale σ_{RR} à l'interface écorce/cambium est simplement donnée par $\sigma_{RR} \approx -\sigma_{TT} \frac{e}{R}$, où e est l'épaisseur de l'écorce et R son rayon moyen. Il nous suffit donc de déterminer l'état de contrainte tangentielle de l'écorce. Dans un matériau orthotrope et soumis à une contrainte bidimensionnelle, σ_{TT} est reliée aux déformations résiduelles par :

$$\sigma_{TT} = \frac{E_T}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} (-\varepsilon_{TT} - \nu_{LT}\varepsilon_{LL})$$

avec σ_{TT} : Contrainte tangentielle ; E_T : Module d'Young tangentiel ; ν_{TL}, ν_{LT} : Coefficients de Poisson ; ε_{TT} : Déformation résiduelle tangentielle ; ε_{LL} : Déformation résiduelle longitudinale. Cette équation décrit la contrainte tangentielle exercée par l'écorce. Elle dépend du module d'Young tangentiel, des déformations résiduelles tangentielle et longitudinale, et des coefficients de Poisson. Nous considérerons dans un premier temps que la déformation longitudinale et les coefficients de Poisson sont petits si bien que cette équation se réduit à $\sigma_{TT} \approx -E_T \varepsilon_{TT}$.

L'objectif de ce travail est d'évaluer ces deux paramètres : module d'Young tangentiel et déformation résiduelle tangentielle.

Matériel et méthodes

Matériel d'étude et échantillonnage

Nous avons choisi 4 tilleuls (*Tilia sp.* Malvaceae). Pour chaque arbre, nous avons prélevé le matin 3 rejets en prenant garde d'éviter leur dessiccation. Ceci a été fait à la fin du printemps quand le cambium est actif et que l'écorce peut se décoller facilement du bois. Dans chacun des rejets, 4 segments de 35 mm de long sont découpés pour réaliser les mesures des déformations résiduelles et des modules d'élasticité. 3 échantillons d'écorce supplémentaires sont prélevés in vivo et immédiatement conservés dans des piluliers afin de contrôler l'éventuelle perte en eau de l'écorce entre le prélèvement et les mesures mécaniques. En effet, celle-ci pourrait affecter la représentativité de la mesure. Ces échantillons sont pesés à l'état natif puis après passage à l'étuve à 103°C pendant 24h, afin d'en déterminer la teneur en eau.

Mesure de la déformation résiduelle tangentielle

La section transverse des segments prélevés est prise en photo afin de mesurer le périmètre et l'épaisseur de l'écorce (Fig. 1.1). Ensuite, l'écorce est incisée longitudinalement et délicatement décollée du bois. Il en résulte un tube d'écorce, légèrement ouvert du fait de la déformation résiduelle (Fig. 1.2 et Fig. 2). Le cylindre de bois est retiré et le tube d'écorce est refermé puis collé au niveau de la zone incisée. Sa section est de nouveau prise en photo, afin de mesurer le nouveau périmètre (Fig. 1.3). La déformation résiduelle tangentielle est simplement donnée par la variation relative de périmètre entre le segment avant la découpe et le tube recollé.

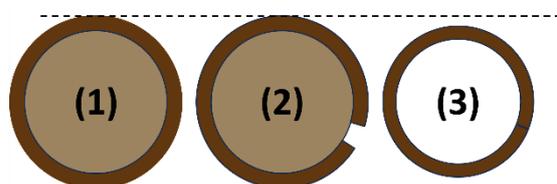


Fig. 1 : (1) échantillon avec bois solidaire de l'écorce, (2) écorce incisée, (3) écorce refermée sans le bois



Fig. 2 : Echantillon après incision de l'écorce

Mesure du module d'Young

Le module d'Young est mesuré en insufflant de l'air sous pression dans les tubes d'écorce. Pour cela, une baudruche en silicone est moulée à l'intérieur des tubes et à leurs extrémités. L'air est injecté par une seringue via un tuyau équipé d'un capteur de pression. Un mouchetis est appliqué à la surface du tube d'écorce (à l'opposé du trait de colle), devant lequel est placé une caméra (Fig. 3). La seringue est disposée dans une machine de compression qui injecte de l'air dans le tube. Des photos sont prises à intervalles réguliers à mesure que le tube se gonfle. Les déformations à la surface de l'écorce sont déterminées par corrélation d'image.

Pour certains essais, des rotations du tube et translations hors-plan sont remarqués ce qui empêche une détermination correcte du champ de déformation. Seule la moitié des essais s'avèrent exploitables. En faisant l'hypothèse que le tube d'écorce a une épaisseur petite si bien que l'on peut supposer que la contrainte est constante dans l'épaisseur, on peut écrire $\sigma_t = \frac{Pr}{e}$ où σ_t est la contrainte tangentielle à la surface de l'écorce, P la pression au sein du tube, r le rayon interne du tube d'écorce et e l'épaisseur du tube.

Les tubes d'écorce sont pesés aux différentes étapes afin de contrôler la perte en eau. La durée totale de l'expérimentation est de 30h. Durant cette période, les échantillons sont conservés

dans une chambre hermétique dont l'humidité relative est proche de 100% pour limiter leur déshydratation.

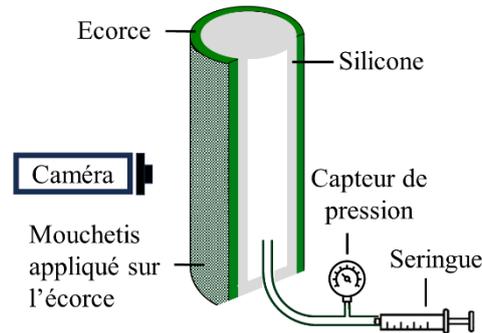


Fig. 3 : Dispositif de mesure du module d'Young tangentiel

Résultats et discussion

Teneur en eau

La Fig. 4 présente la teneur en eau in vivo, avant et après essai pour chaque arbre. La teneur en eau avant essai est représentative de celle in vivo et aucune différence significative n'est observée. En revanche, comme le montre la Fig. 5, la teneur en eau après essai est systématiquement inférieure à celle avant essai avec une différence d'environ 13.4 ± 2 . La perte en eau durant l'expérimentation est significative (p -value= $8e-06$), mais reste relativement faible comparée aux valeurs initiales.

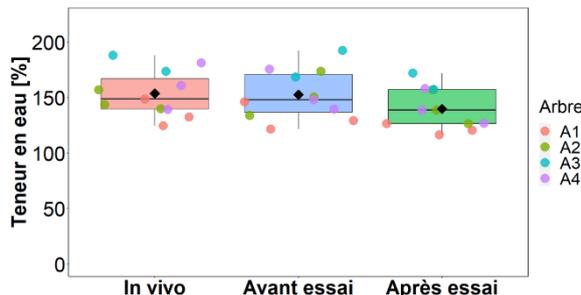


Fig. 4 : Teneur en eau en fonction de la mesure dans le temps (in vivo, avant et après essai)

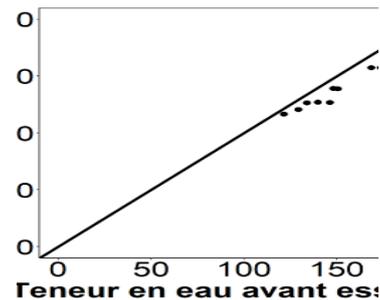


Fig. 5 : Teneur en eau après essai en fonction de celui avant essai

Déformation résiduelle tangentielle

La Fig. 6 représente la déformation résiduelle tangentielle pour chaque arbre (A1 à A4) (les déformations sont des retraits mais sont exprimées en valeurs positives). La moyenne de ces déformations s'élève à $2.5\% \pm 0.4$, aucune différence significative n'est observée entre les arbres (p -value= 0.49). Sur la Fig. 7 est représentée la déformation résiduelle tangentielle en fonction du rayon, pour chaque échantillon. L'incertitude absolue maximale pour la déformation résiduelle tangentielle vaut 0.49% et pour le rayon externe, 0.12 mm (étude réalisée sur 5 échantillons mesurés chacun 5 fois). Il n'y a pas de corrélation entre la déformation résiduelle tangentielle et le rayon externe sur la gamme d'échantillons étudiés.

Module d'Young

La Fig. 8 montre le module d'Young tangentiel de l'écorce par arbre. Le module moyen est égal à 57.9 MPa ± 5.7 . La dispersion est très grande, si bien que la différence entre arbres n'est que marginalement significative (p -value= 0.051). La Fig. 9 montre le module d'Young

tangentielle en fonction du rayon externe et de l'épaisseur de l'écorce. Aucune corrélation n'est observée sur la gamme d'échantillons étudiés.

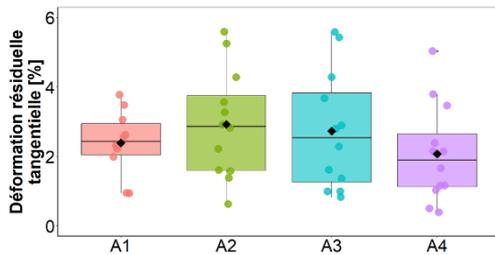


Fig. 6 : Déformation résiduelle tangentielle (de retrait) au sein de chaque arbre

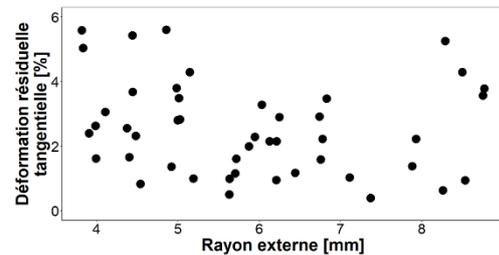


Fig. 7 : Déformation résiduelle tangentielle en fonction du rayon externe de l'écorce

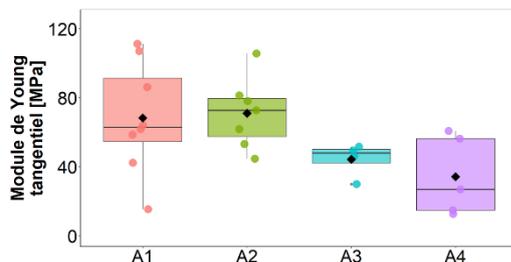


Fig. 8 : Module d'Young tangentielle de l'écorce en fonction des arbres

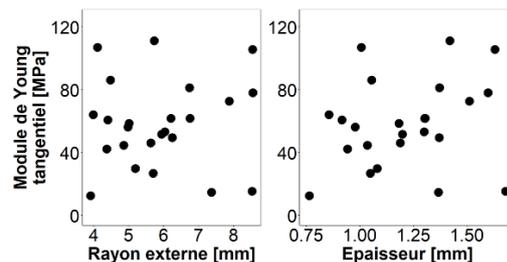


Fig. 9 : Module d'Young tangentielle de l'écorce en fonction du rayon externe et de l'épaisseur de l'écorce

Contrainte radiale à l'interface cambium/écorce

L'étude de la déformation résiduelle tangentielle et du module d'Young tangentielle de l'écorce nous a permis d'estimer des ordres de grandeur. Si on suppose que celles-ci sont représentatives de l'état *in vivo*, et en prenant en compte les moyennes issues des déformations résiduelles tangentielles et des modules tangentiels, soit respectivement 2.5 % et 57.9 MPa et pour un rapport moyen e/R d'environ 0.26, d'après $\sigma_{RR} \approx E_T \varepsilon_{TT} \frac{e}{R}$, la contrainte radiale serait équivalente à 3.7 bars. Ce résultat peut être mis en relation avec des résultats préliminaires de pression de turgescence du cambium, mesurés à l'aide d'une sonde à pression sur du margousier, montrant une pression d'environ 3 bars (essais réalisés sur 5 échantillons). Cela est équivalent aux valeurs que l'on peut trouver dans des tissus primaires, soit entre 2 et 10 bars (Hüsken et al. 1978, Tomos 1988). Néanmoins, la valeur de la contrainte radiale de l'écorce que nous avons quantifiée semble loin d'être négligeable devant la pression de turgescence, indiquant que l'écorce tend à inhiber la croissance cambiale. D'autant plus que cette contrainte est sous-estimée, nous avons négligé ici la déformation résiduelle longitudinale et les coefficients de Poisson. Ces derniers peuvent être très grands, en particulier dans la famille des Malvacées (Clair et al. 2022) et seront évalués ultérieurement.

Remerciements

Nous aimerions remercier Sebastien DYCKE, assistant ingénieur électronicien pour sa contribution au système de mesure de la pression pour le gonflement des tubes d'écorces.

Ces travaux sont co-financés par le LabEx NUMEV (ANR-10-LABX-0020), intégré à l'I-Site MUSE (ANR-16-IDEX-0006), et la région Occitanie.

Références

Clair B, Corn S, Baranger A, Regazzi A, Bares J, Lehnebach R, Alméras T (2022) Bark biomechanical function: smart tissue organization enables extreme mechanical performance in the secondary phloem of Malvaceae, 10th Plant Biomechanics Conference, Lyon, France.

Hüsken D, Steudle E, Zimmermann U. (1978) Pressure probe technique for measuring water relations of cells in higher plant, *Plant Physiol*, 61:158-163

Kojs P, Miodek A, Miodek AP, Włoch W (2023) Vascular cambium — between the hammer and the anvil: a tensile stress hypothesis on the mechanism of radial growth of broadleaved tree, *Forests*, 14:823

Kwiatkowska D, Nakielski J (2011) Mechanics of the meristems, In: Wojtaszek, P, *Mechanical integration of plant cells and plants, signaling and communication in plants*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 133-172

Lockhart JA (1965) An analysis of irreversible plant cell elongation, *J. Theor. Biol*, 8:264-275

Tomos AD (1988) Cellular water relations of plants, *Water Science Reviews*, 3:186–277.

Comportement hystérétique des assemblages mécaniques de type tige

GOMEZ Dalmer¹, CUMUNEL Gwendal¹, BORNERT Michel¹, PEYRET Nicolas²,
CATTEROU Thomas³

¹Navier, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, CNRS, F-77455 Marne-la-Vallée, France

²Laboratoire Quartz, ISAE-Supmeca, 3 rue Fernand Hainaut, Saint-Ouen, 93400, France

³FCBA, Institut technologique du bois, Allée du Boutaut, Bordeaux, 33000, France

dalmer.gomez@enpc.fr

Mots clés : assemblage bois ; hystérésis

Contexte et objectifs

L'utilisation de l'assemblage de type tige est très répandue dans la construction en bois surtout pour les bâtiments de grande hauteur. Pour ces derniers le comportement vibratoire dissipatif est en partie gouverné par celui des assemblages (Boudaud 2012).

Lors d'un chargement cyclique, un comportement hystérétique est constaté pour ce type d'assemblage (Boudaud 2012, Reynolds et al. 2014). Ce comportement dépend de plusieurs paramètres liés au matériau mais aussi au chargement. Le but de cette étude est d'évaluer le comportement de l'assemblage de type broche soumis à une sollicitation cyclique.

Dispositif expérimental

Pour la constitution de l'assemblage, une plaque métallique de 1 cm d'épaisseur est utilisée ainsi qu'une poutre en bois lamellé-collé (de classe GL24) et des broches en acier galvanisé de 8 mm de diamètre.

La poutre en bois a une section de 12 cm de largeur par 8 cm d'épaisseur. En accord avec l'EN 383 et l'Eurocode 5, les perçages dans le bois sont espacés d'au moins cinq fois le diamètre d'une broche dans la direction du fil et d'au moins trois fois le diamètre parallèle au fil. Le diamètre de perçage est de 8 mm pour le bois et de 9 mm pour la plaque métallique. Une rainure de 1,2 cm de largeur est réalisée dans le bois, après perçages, afin de permettre la mise en place de la plaque (Fig. 1).

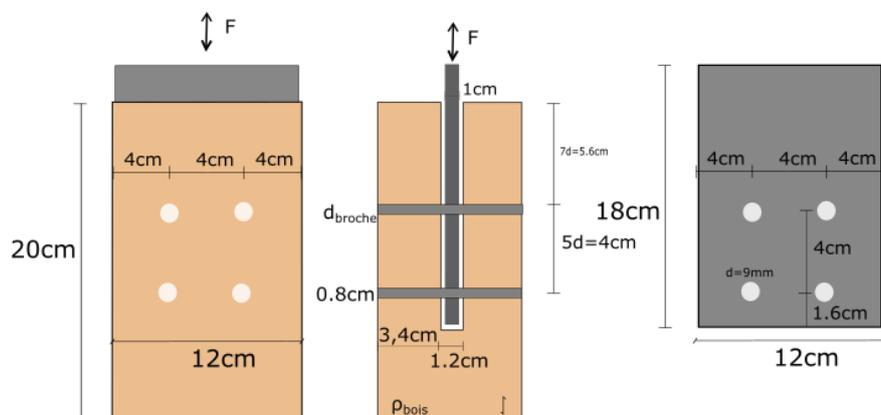


Fig. 1 : Dimensions des échantillons

Une fois l'échantillon usiné, un mouchetis est appliqué à la surface de celui-ci pour la corrélation des images obtenues lors du test. Les broches sont insérées en force à l'aide d'un marteau en posant l'échantillon sur une surface plane. L'échantillon est ensuite mis en place

sur le banc d'essai, dont la base est constituée d'un élément métallique ayant une surface plane. La plaque métallique de l'échantillon est connectée à la machine de compression (Instron 100 kN) par l'intermédiaire d'une pièce rigide, liée au capteur de force, comportant quatre perçages permettant de fixer la plaque de notre échantillon à l'aide de boulons. Une illustration de l'expérience est présentée sur la Fig. 2.

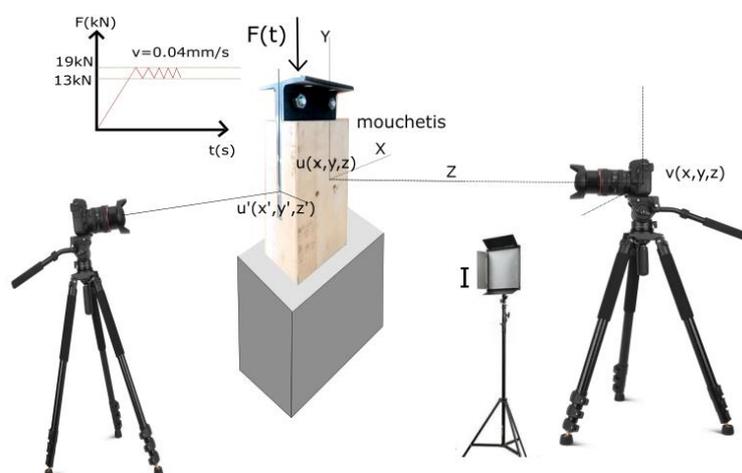


Fig. 2 : Montage des tests effectués

Deux caméras ont été utilisées pour les essais : la première capte les déplacements de la plaque dans sa longueur (pour valider l'hypothèse de faibles rotation, déplacement et déformation de la plaque) et la deuxième capte les déplacements des broches et de la plaque dans le bois. La fréquence d'acquisition était comprise entre 1 Hz et 10 Hz selon la durée du test, la vitesse de chargement et l'espace de stockage. Les images ont été analysées par corrélation d'images avec le logiciel CMV développé au laboratoire Navier. Une machine de compression Instron avec une capacité de 100 kN a été utilisée pour appliquer le chargement cyclique. La force maximale à atteindre selon l'Eurocode 5 est d'environ 30 kN, sans appliquer de facteurs modificateurs ni de coefficients partiels, et le mode II de déformation (rotule plastique) est attendu pour la broche. Pour tous les tests (Tab. 1), les fibres du bois des échantillons testés sont parallèles au chargement.

Tab. 1 : Liste des tests effectués

| N° | ρ (kg/m ³) | Chargement |
|-----|-----------------------------|--|
| OB1 | 414 | 5 cycles en déplacement de 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 mm de déplacement de la plaque (25 cycles au total) |
| OB2 | 393 | 5 cycles en déplacement de 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 mm de déplacement de la plaque (25 cycles au total) |
| OB3 | 484 | 6 cycles à 16 kN de précharge, 3 kN d'amplitude et une vitesse de 0,04 mm/s |
| OB4 | 435 | 6 cycles à 16 kN de précharge, 8 kN d'amplitude et une vitesse de 0,8 mm/s |
| OB5 | 406 | 6 cycles à 16 kN de précharge, 8 kN d'amplitude et une vitesse de 0,04 mm/s |

Les tests OB1 et OB2 ont été effectués pour vérifier la répétabilité des essais et les tests OB3 à OB5 ont des paramètres communs : les tests OB3 et OB4 ont la même vitesse de chargement et les tests OB4 et OB5 ont la même amplitude de chargement. Pour ces tests, une précharge de 16 kN (force limite pour la mesure de la raideur « élastique » de l'assemblage) est appliquée à l'assemblage.

Résultats des essais

Grâce à la corrélation d'images, les déplacements effectifs, qui diffèrent des déplacements obtenus à partir de la machine de compression, sont déterminés. Ces déplacements effectifs correspondant aux glissements obtenus pour l'assemblage seront utilisés pour l'analyse des résultats. La déformation de l'élément bois est déduite tout comme le déplacement de la base métallique de la machine de compression.

Pour les tests OB1 et OB2, une différence nette de la courbe enveloppe du chargement est constatée, cependant les cycles ont la même allure (Fig. 3). Concernant l'hystérésis, l'énergie dissipée décroît avec le nombre de cycles, la partie la plus importante étant dissipée lors du premier cycle (Fig. 4).

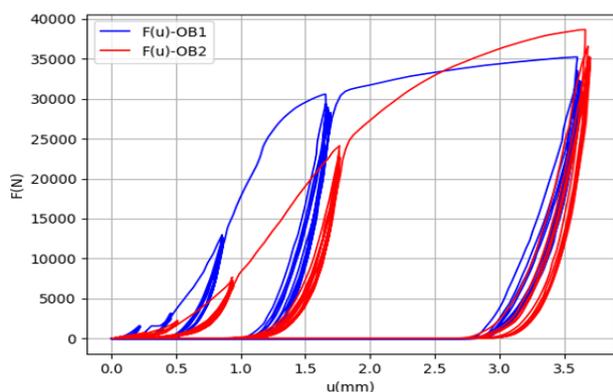


Fig. 3 : Courbes de chargement pour les essais OB1 et OB2

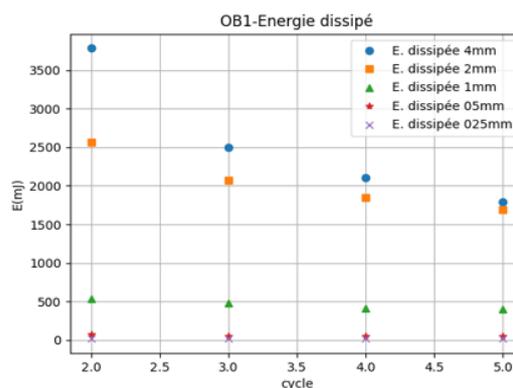


Fig. 4 : Energie dissipée par cycle pour le test OB1

L'analyse post-mortem montre des déformations localisées du bois et une plastification des broches (Fig. 5), l'angle des broches dû à la plastification étant quasiment identique pour les 4 broches. Pour le bois, un micro flambement est constaté au niveau du contact avec la broche (Fig. 6).

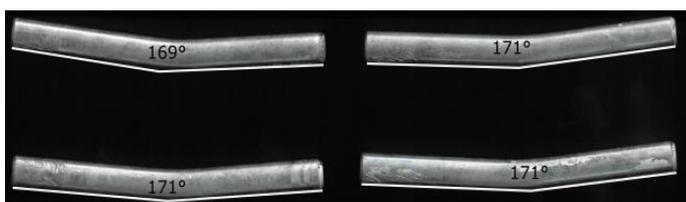


Fig. 5 : Déformation des broches pour l'essai OB1

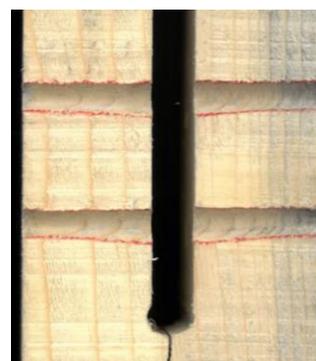


Fig. 6 : Vue longitudinale après test OB1

Pour les tests OB3 à OB5, la dissipation d'énergie est d'autant plus importante que l'amplitude du cycle est importante. La pente de la courbe OB3 est plus élevée (Fig. 7) car cet échantillon est le plus dense. Les tests OB4 et OB5 sont similaires, cependant les résultats obtenus pour le test OB4 sont limités dû à la vitesse de chargement appliquée (0,8 mm/s, la limite de la machine étant de 1 mm/s).

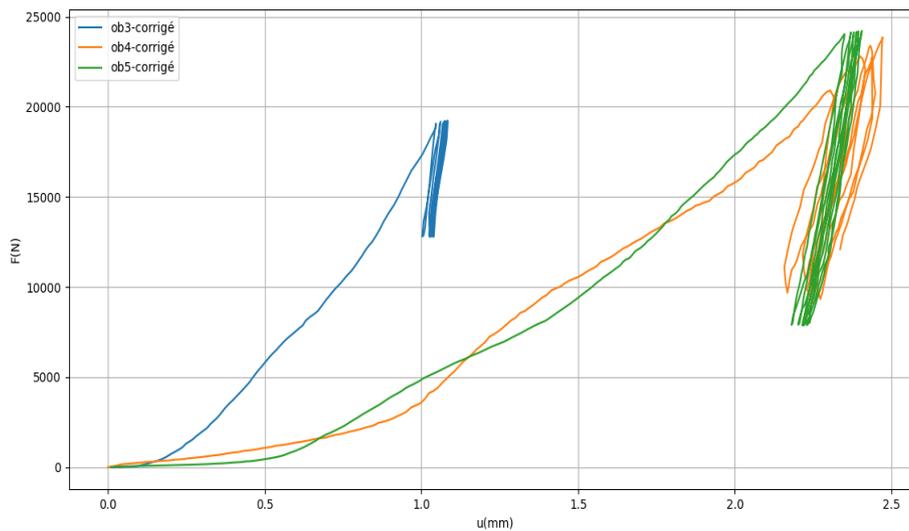


Fig. 7 : Résultat des tests OB3 à OB5

L'énergie partielle dissipée (Fig. 8) diminue avec le nombre de cycles jusqu'à atteindre des valeurs stables après 3 ou 4 cycles.

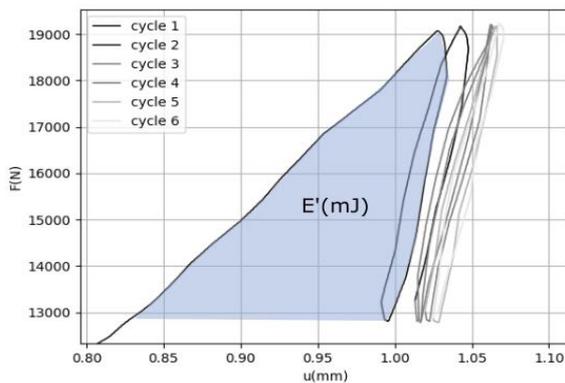


Fig. 8 : Courbes de chargement du test OB3

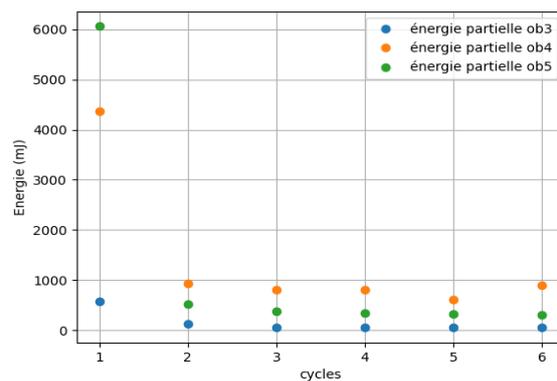


Fig. 9 : Energie dissipée lors des cycles

Pour le test OB4, l'énergie dissipée varie entre les cycles 4 et 6 (manque de précision du capteur de force). L'énergie dissipée du test OB5 est plus importante que celle du test OB3 (Fig. 9). Cela est dû à la différence d'amplitude de chargement entre ces deux tests et, dans une moindre mesure, aux caractéristiques différentes des échantillons.

Conclusion

Les différences entre deux tests cycliques seraient dues aux caractéristiques mécaniques du bois et à l'hyperstatisme du contact (1 ou 4 contacts en début du chargement) entre la broche, la plaque métallique et le bois. Les courbes force-déplacement et l'énergie dissipée se stabilisent après 3 ou 4 cycles.

Une perte de résistance est constatée lors des cycles, que ce soit en déformation ou en force imposée. La dissipation d'énergie la plus importante est obtenue lors du premier cycle et décroît ensuite en fonction du nombre de cycles. Cela implique qu'un comportement cyclique stabilisé existe pour une amplitude de chargement donnée une fois qu'une fraction du métal et/ou du bois a plastifié.

Finalement, l'impact de l'amplitude du chargement s'observe en termes de quantité d'énergie dissipée. Les essais n'ont cependant pas permis d'identifier une influence de la vitesse de

chargement dans la gamme de vitesse testée. Dans la littérature, l'assemblage a un comportement visqueux (Girhammar et Andersson 1988), néanmoins cela peut être négligé pour de faibles vitesses de chargement, ce qui est le cas dans cette étude.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Navier à l'École des Ponts Paristech dans le cadre du projet DynaTimberEyes (AAPG 2021) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et en partenariat avec l'ISAE Supméca et le FCBA.

Références

- Boudaud C. (2012) Analyse de la vulnérabilité sismique des structures à ossature en bois (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- Reynolds T., Harris R., Chang W.S. (2014) Stiffness of dowel-type timber connections under pre-yield oscillating loads. *Engineering Structures*, 65, 21-29.
- Girhammar U.A., Andersson H. (1988) Effect of loading rate on nailed timber joint capacity. *Journal of Structural Engineering*, 114(11), 2439-2456.

La maquette des Halles de Villeréal. Des perspectives d'artisans pour contribuer à l'étude scientifique d'une construction en bois vert.

BRIHIEZ Joseph¹, LEFEVRE Marc², RAMBAUD Paul³

¹Laboratoire Eco-Anthropologie, CNRS, Muséum National d'Histoire Naturelle,
Université de Paris, Paris

²Association Iron Rabbits, Nivillac

³SARL De l'arbre à la maison, Nivillac

jbrihiez@gmail.com

Mots clefs : bois vert ; charpente équarrie à la hache ; monument historique ; gestion forestière ; arbres ; stratégies écologiques ; convergence de compétences scientifiques et techniques.

Contexte et objectifs

Depuis une dizaine d'années quelques artisans charpentiers avaient entrepris une réappropriation des conditions d'exercice de leur métier mettant en valeur des techniques anciennes, tirant parti de l'usage d'un bois vert. Non seulement les divergences avec les pratiques en cours dans le domaine de la charpente étaient d'ordre technique, mais celles-ci impliquaient plus largement une bifurcation avec ce qui composait l'unité des méthodes de la filière forêt-bois conventionnelle.

Alors que l'emploi du bois vert constituait jusqu'alors une relative exception dans le domaine professionnel de la charpente et qu'il demeurait peu visible tant pour le grand public que pour les spécialistes, l'incendie de Notre-Dame (N-D) vint bouleverser cet ordre des choses.

Suite à l'implication collective des charpentiers travaillant le bois vert à la hache qui ont voulu démontrer que la charpente de N-D pouvait manifestement être reconstruite « à l'authentique », ceux-ci ont mené une action d'éclat consistant à reproduire la ferme n°7 de N-D qui a eu pour conséquences d'affirmer leurs valeurs et leurs convictions, traduisant leur vision de l'utilisation de l'arbre en charpenterie. Cette démarche aboutira à orienter l'attention générale autour de la question de l'usage du bois vert, notamment celle de scientifiques du bois, et finalement à ce que la reconstruction des charpentes médiévales de N-D s'accomplisse selon les choix techniques conformes à leur initiative.

À ce stade, on assista à une mobilisation de l'intérêt des scientifiques du bois autour de la question de l'usage du bois vert et, bien évidemment, de sa durabilité mécanique.

Jusqu'à leur activité n'était pas articulée à celle des praticiens du bois vert. L'inauguration de cette articulation ne devait pas tarder à se présenter.

Tout partit d'une rencontre avec Emmanuel Maurin (LRMH) lors des précédentes rencontres du GDR Bois à Nice. Les conversations auxquelles je le conviais à considérer ma pratique au sein de l'*Association Iron Rabbits* en tant que charpentier-équarrisseur à la hache lui suggérèrent d'aller puiser dans notre expérience le moyen de réaliser un projet qu'il avait alors en collaboration avec Alain Cointe (IUT de Bordeaux, Dép. GCCD) et la doctorante Sarah Bouhlef. C'est ainsi que la fabrication d'une maquette (échelle 1/3) des Halles de Villeréal en bois vert et taillée à la hache allait être confiée à notre association dans l'intention de former un objet d'étude soumis à leur protocole de recherche.

Cette maquette en bois équarris offrait l'avantage d'une plus grande conformité technique à la charpente originale de ces halles tout en mettant à contribution des artisans participant au processus de production de savoirs relatifs à la mise en œuvre du bois vert.

Matériel et méthode

Des plans réalisés par Sarah Bouhlel (dont la thèse porte sur l'analyse des propriétés de la maquette) à l'aide d'un logiciel de modélisation, assortis d'une fiche de débit furent remis à l'équipe de charpentiers, qui se chargea de sélectionner en forêt les chênes sur pied destinés au bois d'œuvre. La forêt de Bretèche (56) constitue une réserve de bois d'œuvre alimentant les ateliers de charpente locaux.

Les sujets sélectionnés furent abattus durant la fin de l'hiver 2022-2023 par des bûcherons professionnels.

Ils furent débardés courant juin par un attelage de chevaux de traits menés par Laurent Legal (professionnel).

Les plus grandes pièces de la maquette furent équarrées à la hache en forêt durant le mois de juin et le reste fut transformé à l'atelier de l'entreprise de charpente « De l'arbre à la maison » (56) dès septembre.

Résultats et discussion

Compte tenu de l'échelle réduite (1:3), une adaptation fut nécessaire pour produire des pièces d'aussi faible section. Constatant que cette adaptation faisait chez nous l'objet de dilemmes, des interrogations persistent, elles portent sur les limites de la sélection des arbres et de l'approche classique en équarrissage, conçu généralement en bois de brin.

Conclusion et perspectives

À aucun stade de cette fabrication le bois vert nous est apparu former un obstacle véritable contrairement aux problèmes soulevés par le choix des arbres qui ne peuvent être parfaitement appropriés (les sujets requis en vue d'une parfaite adéquation ne sont pas destinés à être abattus) ce qui nous oblige à déroger au respect du fil du bois.

Il nous semble donc que ce qui donne leur pertinence aux techniques manuelles du bois vert réside dans la compatibilité entre la forme organique des arbres et la forme des pièces employées. Ainsi conçue, la formule en bois vert interroge la gestion des forêts ainsi que la conception des charpentes dans la perspective d'un avenir souhaitable de la filière forêt-bois.

Caractérisation biochimique et phénotypage haut-débit de la collection nationale de robinier par spectrométrie proche infrarouge

BELMOKHTAR Nassim^{1,2}, TOUZET Orlande¹, BOIZOT Nathalie^{1,2}, BERNIER Frédéric³,
BRETON Christian¹

¹ UMR BioForA, INRAE, ONF, 45075 Orléans, France

² Plateforme Phenobois, INRAE, 45075 Orléans, France

³ UEFP, INRAE, 33610 Cestas, France

nassim.belmokhtar@inrae.fr

Mots clefs : dihydrorobinétine (DHR) ; robinétine (ROB) ; robinier ; SPIR ; HPLC ; calibration ; qualité du bois ; durabilité.

Contexte et objectifs

Le robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) est une légumineuse originaire d'Amérique du Nord introduite en France au début du XVII^{ème} siècle par Jean Robin. A ce jour, elle est présente sur l'ensemble du territoire français et européen et représente de fait la deuxième espèce d'arbre plantée dans le monde après l'eucalyptus (Wang, Zhang et al. 2023). Au niveau français, elle représente environ 28 millions m³ de bois sur pied répartis sur environ 200000 hectares (IGN 2022). Considérée comme une espèce invasive, le robinier n'a suscité jusqu'à récemment que très peu d'intérêt. Il présente toutefois de grands intérêts du fait de sa croissance rapide et de l'excellente durabilité naturelle de son bois (classe 1 dans la norme EN350). A ce jour, le bois de robinier est essentiellement utilisé pour le chauffage, la fabrication de piquets et de meubles extérieurs en remplacement des bois tropicaux. Une démarche de sélection rigoureuse d'individus élites échantillonnés sur l'ensemble du territoire français et basée sur des critères de croissance (vigueur, rectitude du tronc et droit fil) a permis récemment de constituer une première collection nationale de robinier (CNR) incluant environ 300 arbres (Barbier, Merzeau et al. 2016).

Des travaux menés préalablement au sein de notre laboratoire ont permis de mettre en évidence la production et l'accumulation de grandes quantités de molécules d'intérêt dans le bois de cœur du robinier. Il s'agit de la dihydrorobinétine (DHR, 35 à 40 % des extractibles) et de la robinétine (ROB, 5 à 10 % des extractibles) qui sont respectivement dotées de propriétés antimicrobiennes et de fluorescence (Fig. 1). Ces deux molécules suscitent actuellement de grands intérêts chez nos partenaires industriels que ce soit pour la production d'actifs antimicrobiens ou de pigments fluorescents (applications cosmétiques, sanitaires, phytosanitaires, Projet IR-VDL ValRob, 2012-2016) mais aussi pour une utilisation directe du bois sous la forme de paillages bio-actifs antimicrobien (projet IR-VDL WoodProActif, 2020-2024).

Les travaux que nous présentons ici entrent dans le cadre de ce dernier projet et ont pour objectif d'affiner la sélection phénotypique déjà réalisée sur les individus de la CNR en y ajoutant des critères de production de molécules d'intérêt (DHR et ROB). Notre étude a ainsi pour objectif de faire appel à la spectrométrie proche infrarouge pour développer des courbes de calibration capables de prédire les teneurs en DHR et en ROB pour l'ensemble des individus de la CNR. Cet outil de phénotypage indirect à haut-débit devrait nous permettre à terme de sélectionner les géotypes les plus producteurs de biomolécules pour la production industrielle d'extraits.

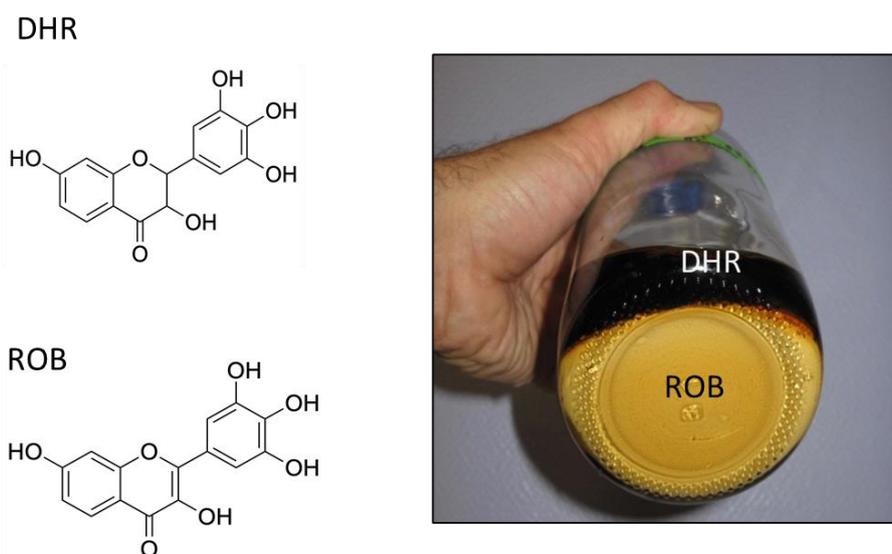


Fig. 1 : structures chimiques de la DHR et de la ROB
D'après (Bostyn et al. 2018).

Matériel et méthodes

Préparation de la biomasse lignocellulosique

Les 300 échantillons biologiques proviennent de la collection nationale de robinier située à l'Unité Expérimentale Forêt Pierroton (UEFP) d'INRAE à Cestas (sud-ouest de Bordeaux). Des rejets de souche de différents diamètres (quelques mm à plus de 30 mm) ont été collectés lors de la taille hivernale sur chaque individu. Après séchage à l'étuve (48 h – 40 °C), les stipules (épines) de chaque branche ont été éliminées. Ensuite, chaque branche référencée a été découpée au sécateur, finement broyée et stockée individuellement jusqu'à analyse au sein du site Orléanais de la plateforme Phénobois.

Acquisition de spectres proche infrarouge

Les spectres ont été acquis par réflexion diffuse sur la poudre de bois de chaque échantillon dans des tubes en verre déposés sur la sphère d'intégration de l'accessoire NIRA du spectromètre infrarouge Frontier (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA). Tous les spectres ont été pris entre 10000 et 4000 cm^{-1} (1000 et 2500 nm) avec un intervalle de 2 cm^{-1} . Chaque spectre résulte de la moyenne de 64 scans successifs.

Prétraitement des spectres

L'acquisition des spectres dans le proche infrarouge s'accompagne par la présence de bruits qu'il est nécessaire d'atténuer afin d'accéder à l'information en lien avec la présence des molécules d'intérêt dans l'échantillon. Sept prétraitements couramment utilisés en chimiométrie ont été appliqués à l'ensemble des spectres (Rinnan et al. 2009, Engel et al. 2013). Pour ce faire, nous avons fait appel à des fonctions mathématiques implémentés dans des bibliothèques disponibles dans R.

Dosages biochimiques

Le développement des modèles de prédiction passe par l'utilisation d'un jeu d'étalonnage constitué de 120 échantillons présentant un diamètre supérieur à 10 mm, sélectionnés aléatoirement parmi la collection nationale de robinier. Leurs teneurs en DHR et en RB ont été déterminées par une chaîne de chromatographie en phase liquide haute performance (HPLC) VWR-HITACHI® Chromaster couplée à un détecteur DAD. La colonne utilisée est une

LiChrospher® RP-18 EC 250/4.6 5µm 100 Å MERCK à 40 °C. Le gradient de phases mobiles est le suivant : eau ultrapure et méthanol/Acétonitrile 50/50 avec un débit de mL/min. Les données ont été acquises et traitées avec le logiciel OpenLAB CDS version EZChrom.

Développement de modèles prédictifs

Nous avons fait appel à une méthode de régression des moindres carrés partiels (PLS-R) (Wold et al. 2001) afin de relier les données spectrales aux teneurs en DHR et en ROB mesurées au laboratoire.

Nous mettons plus précisément en œuvre une méthode de validation croisée répétée 50 fois sur des segments provenant de la subdivision du jeu de calibration en 4 blocs aléatoires dans le but d'identifier le meilleur modèle en termes de prétraitement et de variables latentes (Anderssen et al. 2006). Ce dernier est enfin appliqué aux autres individus de la collection afin de les caractériser dans leur totalité. L'algorithme pls utilisé est fourni par la librairie rchemo disponible dans (Lesnoff 2021).

Résultats

Teneurs en DHR et ROB

Les dosages biochimiques ont mis en évidence des teneurs en DHR comprises entre 0,03 et 3,37 mg/g de matière sèche, supérieures à celles de la ROB comprises entre 0,16 et 0,66 mg/g de matière sèche (fig. 2).

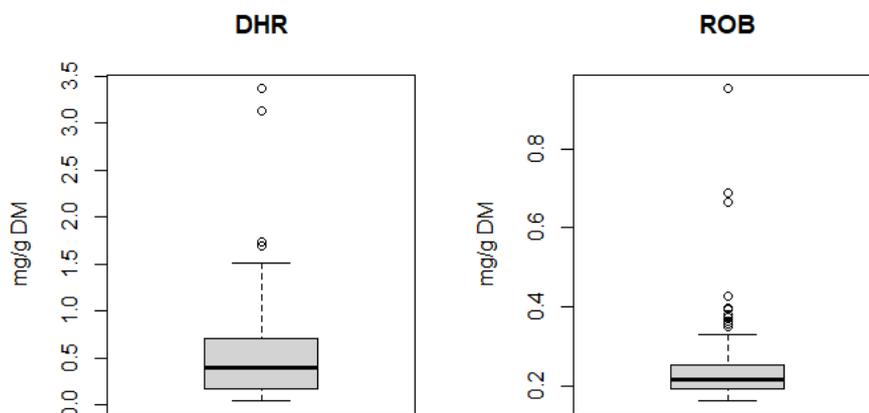


Fig. 2 : teneurs en DHR et en ROB déterminées par dosage HPLC.

Prétraitement des spectres

Les prétraitements que nous avons appliqués ont permis de réduire considérablement le bruit présent dans les spectres bruts (Fig. 3A). Il en résulte une information plus précise sur les bandes spectrales où réside le plus de variabilité (5500 à 4000 cm⁻¹) entre individus (Fig. 3B).

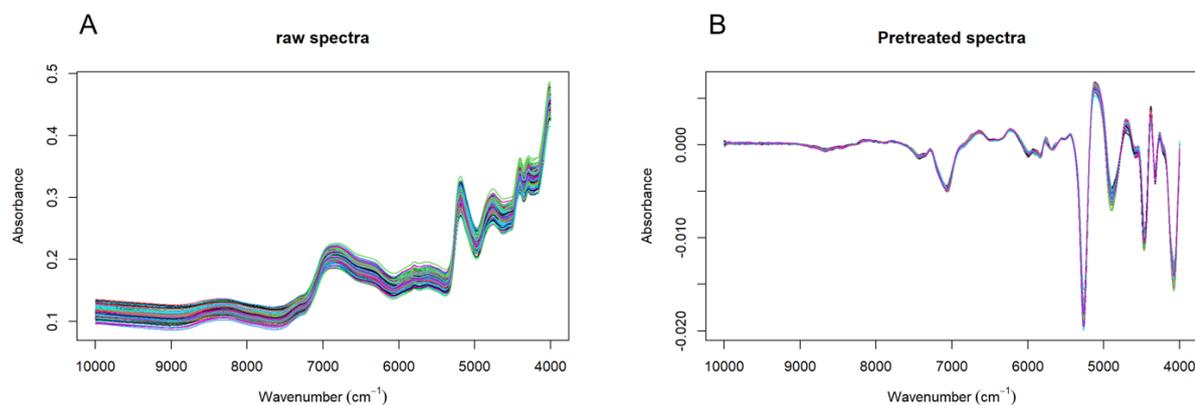


Fig. 3 : représentation graphique des spectres proches infrarouge de robinier avant (A) et après prétraitement(B).

Courbe de calibration

La validation croisée répétée, réalisée sur le jeu de calibration constitué de 120 individus, nous a permis d'identifier le meilleur prétraitement qui consiste à normaliser puis lisser par dérivée première de Savitzky & Golay les spectres proche infrarouge pour obtenir la plus faible erreur quadratique moyenne (RMSE), et ce avec 11 variables latentes calculées par la pls (Savitzky and Golay 1964).

Pour la DHR, l'application du modèle PLSR retenu sur le jeu de calibration indique un modèle atteignant un coefficient de détermination $R^2 = 0,80$ alors que l'erreur de prédiction mesurée sur ce jeu de de calibration est de 0,237 (Fig. 4). Le modèle de prédiction de la teneur en ROB est en cours de développement.

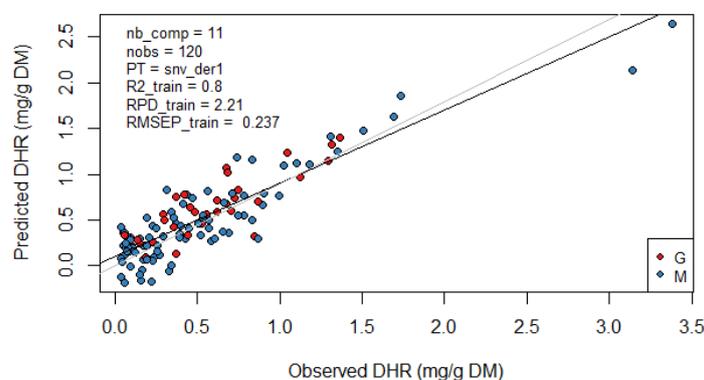


Fig. 4 : Courbe de calibration de la teneur DHR

Conclusions et perspectives

Ces premiers résultats de prédiction de la teneur DHR à partir de 120 individus sélectionnés parmi les 300 clones de la collection nationale de robinier ouvre la voie à un déploiement de la spectrométrie proche infrarouge comme outil de phénotypage haut débit de l'ensemble des géotypes de robinier présentant potentiellement un intérêt pour la recherche ou l'industrie.

Nous poursuivons actuellement nos travaux pour prédire les teneurs en robinétine qui suscite également l'intérêt de l'industrie cosmétique. A terme, il nous semble toutefois intéressant de compléter les modèles actuels (obtenus à partir de rejets de souche) par l'analyse d'échantillons de bois (tronc) qui pourront être obtenus lors du renouvellement de la CNR prévu en 2024.

Remerciements

Nous remercions la région Centre Val de Loire qui a financé ces travaux dans le cadre du projet WoodProActif (convention régionale N° 2020-00138879).

Références

Anderssen E., Dyrstad K., Westad F., Martens H. (2006) Reducing over-optimism in variable selection by cross-model validation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 84(1): 69-74.

Barbier C., Merzeau D., Pastuszka P., Charpentier J.-P. (2016) Une première collection nationale de robiniers. *Forêt Entreprise* (226):10-19.

Bostyn S., Destandau E., Charpentier J.-P., Serrano V., Seigneuret J.-M., Breton C. (2018) Optimization and kinetic modelling of robinetin and dihydrorobinetin extraction from *Robinia pseudoacacia* wood. *Industrial Crops and Products* 126: 22-30.

Engel J., Gerretzen J., Szymańska E., Jansen J.J., Downey G., Blanchet L., Buydens L.M.C. (2013) Breaking with trends in pre-processing? *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 50: 96-106.

IGN I.N.d.I.I.G.e.F. (2022) Chiffres nationaux pour le robinier Faux acacia. from <https://inventaire-forestier.ign.fr/?article1035>.

Lesnoff M. (2021) R Package Rchemo: Dimension Reduction, Regression and Discrimination for Chemometrics. <https://github.com/mlesnoff/rchemo>.

Rinnan Å., v. d. Berg F., Engelsen S.B. (2009) Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 28(10): 1201-1222.

Savitzky A., Golay M.J. (1964) Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry* 36(8): 1627-1639.

Wang Z., Zhang X., Lei W., Zhu H., Wu S., Liu B., Ru D. (2023) Chromosome-level genome assembly and population genomics of *Robinia pseudoacacia* reveal the genetic basis for its wide cultivation. *Communications Biology* 6(1):797.

Wold S., Sjöström M., Eriksson L. (2001) PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 58(2): 109-130.

Approche par calculs fractionnaires du fluage viscoélastique non linéaire du bois de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*)

NGUEDJIO Loïc Chrislin¹, NGAMGA MABEKOU Sandrine¹, MOUTOU PITTI Rostand^{2, 3},
TALLA Pierre Kisito¹

¹Unité de Recherche de Mécanique et de Modélisation des Systèmes des Physiques
(UR2MSP) ; Département de Physiques, Faculté des Sciences, Université de Dschang, BP 67,
Dschang, Cameroun

²Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000,
Clermont-Ferrand, France

³CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

lchristlin2000@gmail.com, tpierrekisito@yahoo.com, rostand.moutou_pitti@uca.fr

Mots clefs : Bois ; fluage ; Sapelli ; modèle fractionnaire de Thomson.

Contexte et objectifs

Le bois apparaît aujourd'hui comme un nouveau matériau de construction moderne et s'impose davantage en structure notamment à cause de son caractère renouvelable, de sa durabilité et de sa mise en forme aisée. Cependant, une fois en service il flue à température ambiante et sous de faibles contraintes, se déforme et fait ainsi face au problème de fluage. Il est donc impératif de contrôler et de développer des solutions adéquates telles que la modélisation et la prédiction adressées à ce phénomène qui peut devenir nocif. Les modèles rhéologiques classiques de prédiction du fluage ont fait l'objet de plusieurs travaux qui pour certains requièrent un grand nombre de paramètres (Tagne 2018). Dans l'optique de concevoir des modèles de prédiction ayant un nombre réduit de paramètres et qui par la même occasion représentent mieux le caractère héréditaire du bois (car la déformation observée à un instant donné dépend des déformations observées aux instants précédents), les modèles rhéologiques fractionnaires ont vus le jour (Krasnobrizha 2016). L'objectif de ce travail est de modéliser et de prédire les déformations du bois de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) utilisé en structure. Pour ce fait le modèle fractionnaire de Thomson est proposé.

Matériels et méthodes

Modèle rhéologique fractionnaire de Thomson

La Fig. 1 nous présente le modèle rhéologique fractionnaire de Thomson à trois paramètres, proposé pour cette étude. L'équation différentielle fractionnaire (Xu, 2019) de ce modèle se présente sous la forme suivante :

$$E_0 D^\alpha \varepsilon(t) + a\varepsilon(t) = b D^\alpha \sigma(t) + c\sigma(t) \quad (1)$$

avec : $a = \frac{E_0 + E_1}{\nu}$, $b = \frac{E_0 E_1}{\nu}$ et $c = \frac{E_1}{\nu(E_0 + E_1)}$.

E_0 et E_1 sont les modules d'élasticité des deux ressorts du modèle et caractérisent le comportement élastique du matériau, ν est le coefficient de viscosité fractionnaire, D^α est la dérivée fractionnaire au sens de Riemann-Liouville (Bekka 2018) et α l'ordre de cette dérivée. $\varepsilon(t)$ et $\sigma(t)$ représentent respectivement la déformation totale et la contrainte totale.

La fonction de fluage $\varepsilon(t)$ du modèle est obtenue en résolvant au moyen de la Transformée de Laplace (Krasnobrizha 2016) l'équation différentielle (1) d'inconnue $\varepsilon(t)$ pour σ constante. La solution est sous la forme suivante :

$$\varepsilon(t) = \sigma \cdot b \cdot E_{\alpha,1}(-at^\alpha) + \sigma \cdot c \cdot t^\alpha \cdot E_{\alpha,\alpha+1}(-at^\alpha) \quad (2)$$

où $E_{\alpha,\beta}$ est la fonction généralisée de Mittag-Leffler (Bekka, 2018).

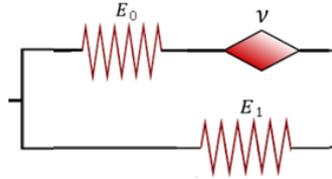


Fig. 1 : Modèle rhéologique fractionnaire de Thomson à trois paramètres.

Méthode expérimentale et méthode numérique

Pour tester la fiabilité du modèle, nous avons effectué des essais de fluage en flexion statique quatre points sur 2 éprouvettes à section carrée de dimensions (20mm × 20mm × 360mm) d'un même tronc de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) Dans un environnement aux conditions climatiques de 24°C de température et de 65% de taux d'humidité relatif, cet essai consiste à exercer une contrainte sur une éprouvette, la maintenir constante et mesurer les déformations dans le temps (Fig. 2). Nous obtenons ainsi un ensemble de points expérimentaux représentant les données du fluage de notre matériau (Fig. 3).



Fig.2 : Photo de l'éprouvette chargée en flexion quatre points.

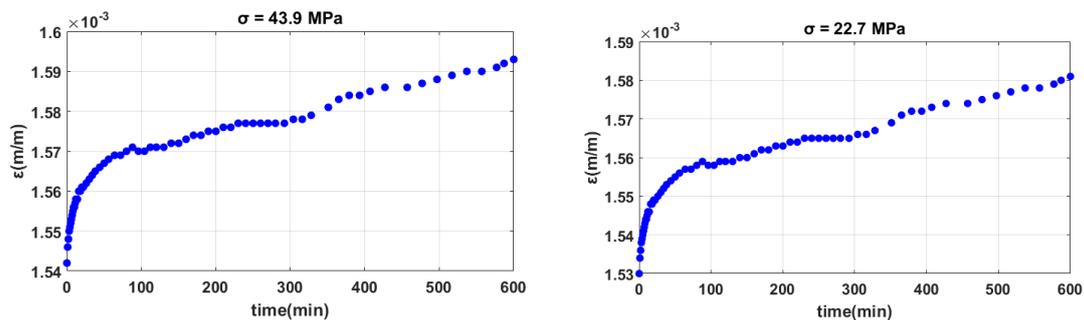


Fig. 3 : Courbes expérimentales du fluage : éprouvettes 1 et 2.

Une fois les données expérimentales à notre disposition, il faut trouver les paramètres optimaux du modèle qui ajustent ces données. Le premier paramètre E_0 est calculé en utilisant la valeur de la déformation initiale instantanée ε_0 relevée lors de l'essai de fluage juste au moment où le matériau est chargé. L'expression de ce paramètre est donnée par :

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

Les autres paramètres E_1 , α et ν sont déterminés en utilisant l’algorithme d’optimisation de Levenberg-Marquardt basé sur le *machine learning*.

Résultats et discussion

En introduisant l’équation (2) donnant la fonction de prédiction du fluage du modèle fractionnaire de Thomson dans l’algorithme, les paramètres optimaux du modèle sont déterminés en ajustant les données expérimentales du fluage. La précision des résultats est également calculée par l’algorithme et la courbe d’ajustement est superposée à celle du fluage expérimental comme le montre la Fig. 4.

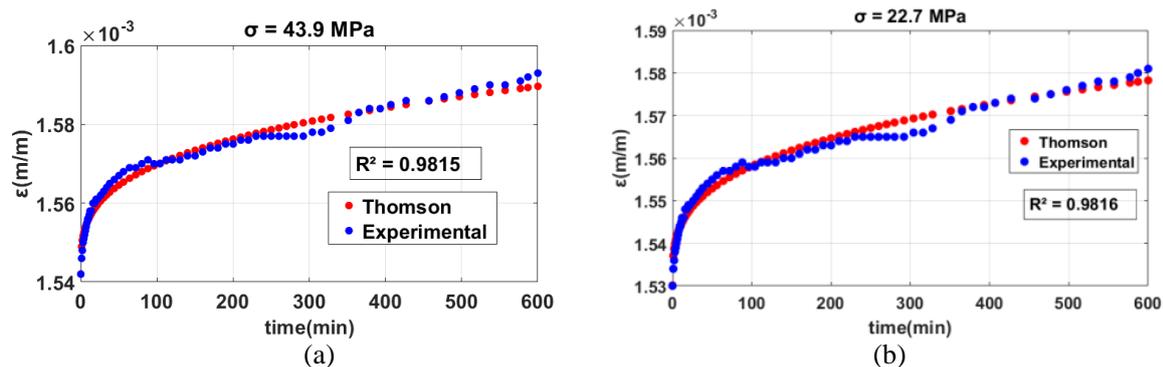


Fig.4 : Prédiction du fluage via le modèle fractionnaire de Thomson : éprouvettes 1 et 2.

En observant les ajustements avec le modèle fractionnaire de Thomson (Fig.2), on se rend compte que la déformation quasi-instantanée ainsi que le fluage primaire sont bien représentés. Le fluage secondaire, quant à lui, présente quelques différences d’adaptation qui peuvent être causées par les fluctuations des conditions environnementales pendant les essais. De façon générale, nous pouvons constater que le modèle fractionnaire de Thomson s’accorde bien avec l’expérimental pour un coefficient de détermination des paramètres de 0,98.

Par ailleurs, les valeurs des paramètres optimaux déterminés par l’algorithme sont présentées dans le Tab. 1 où on peut remarquer que le Sapelli est un bois souple car les déformations croissent avec la contrainte. De plus en diminuant la contrainte, on augmente l’ordre fractionnaire α , augmentant implicitement la viscosité ce qui réduit les glissements aux joints au sein du matériau et dans ce cas les déformations sont moins prononcées.

Tab.1 : Paramètres du modèle fractionnaire de Thomson.

| σ (MPa) | E_0 (10^4 MPa) | E_1 (MPa) | ν (10^{19} MPa.min $^\alpha$) | α |
|----------------|---------------------|-------------|---------------------------------------|----------|
| 43,9 | 2,85 | 0,054 | 0,90 | 0,302 |
| 22,7 | 1,48 | 0,015 | 1,1 | 0,303 |

Conclusion et perspectives

Dans ce travail, l’étude du comportement différé (fluage non linéaire) du bois de Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) a été abordée en utilisant une approche basée sur la théorie du calcul fractionnaire. Il ressort de cette étude que le modèle fractionnaire de Thomson à trois paramètres proposé ajuste le fluage du Sapelli avec une précision moyenne de 98%. Les paramètres optimaux du modèle ont été déterminés grâce à l’algorithme de Levenberg-Marquardt et les résultats ont été validés par les essais expérimentaux montrant que le modèle fractionnaire décrit bien les deux premiers stades du fluage non linéaire du bois de Sapelli. Le modèle fractionnaire de Thomson à trois paramètres peut donc être utilisé en ingénierie comme modèle de prédiction des déformations de ce bois. En guise de perspectives pour ces travaux,

les recherches futures se pencheront sur l'étude du fluage à des niveaux de contraintes plus élevés et prenant en compte les fluctuations des conditions environnementales. Les essais devront être menés sur une période plus grande afin d'étudier la phase tertiaire du fluage et de modéliser le comportement au point de rupture.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Unité de Recherche et de Modélisation des Systèmes Physiques de l'Université de Dschang pour avoir fourni les installations de flexion.

Références

- Bekka A (2018) Calcul numérique des dérivées fractionnaires, mémoire de master en mathématiques de l'université Mohamed Boudiaf De M'sila, République Algérienne Démocratique et Populaire, 33p.
- Krasnobrizha A, Rozycki P, Cosson P, Gornet L (2016) Modélisation des mécanismes d'hystérésis des composites tissés à l'aide d'un modèle collaboratif élasto-plastique endommageable à dérivées fractionnaires, *Matériaux et Techniques*, 104(4), EDP Sciences, p. 407.
- Xu Y, Cheng M, Huang R, Yu, J (2019) The general kelvin model and poynting model based on the general fractional calculus, In: *IOP Conference Series earth and Environmental Science*, volume 252, 9p.
- Tagne NS, Ndapeu D, Nkemaja D, Tchemou G, Fokwa D, Huisken W (2018) Sudy of the viscoelastic behaviour of the *Raffia vinifera* fibres, *Industrial Crops and Products*, 124, p. 572–581.

Utilisation des éco-matériaux locaux pour la construction des bâtiments à empreinte bas carbone en République Démocratique du Congo

LEWO NKONDI Blanca^{1,2}, AZAMA Nicolas¹, BLAYSAT Benoit²,
MOUTOU PITTI Rostand^{2,3}

¹Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics, RD Congo

²Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal,
Clermont Ferrand, France

³CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

blancalewo@gmail.com, nicazrusia@hotmail.com, rostand.moutou_pitti@uca.fr

Mots clefs : Eco-matériaux ; construction ; impact environnemental ; bâtiments ; durable.

Contexte et objectifs

La conception de bâtiments à bilan carbone neutre présente plusieurs défis, notamment la nécessité d'une part, d'utiliser des éco-matériaux (matériaux durables et moins énergivores aussi bien durant leurs cycles de production que pendant leur utilisation), d'autre part, de maximiser l'efficacité énergétique du bâtiment en phase d'exploitation (ECOMAT 2022). Cependant, le choix des éco-matériaux repose sur des facteurs tels que la disponibilité, la durabilité, le coût, le rendement énergétique et environnemental ainsi que la résistance mécanique. C'est ainsi que l'utilisation des matériaux de construction à base d'argile conduirait à l'optimisation des technologies ayant recours aux éco-matériaux, du fait de leur disponibilité en RD Congo, de leur durabilité, de leur bonne isolation thermique et acoustique (Azama Mutonkole 2019 ; Lewo et Azama 2019).

Pour ce faire, cette thèse propose une analyse plus approfondie desdits matériaux, à l'instar de ceux produits par l'entreprise Kwilu-Brique, basée à Kwilu-Ngongo situé à l'Ouest de la RD Congo, en vue d'améliorer leurs caractéristiques actuelles pour les rendre davantage meilleures. A cet effet, quatre adjuvants ont été retenus pour être incorporés dans le mélange de base de la fabrication des briques, à savoir, la sciure de bois, la bagasse et la mélasse. L'objectif final étant d'utiliser ces matériaux, dont les caractéristiques ont été améliorées, dans l'enveloppe du bâtiment pour réduire ses émissions des gaz à effet de serre et en optimiser le confort.

Matériel et méthode

Le processus de fabrication des échantillons est montré dans la Fig. 1.

Résultats attendus

Du point de vue des caractéristiques physiques : un suivi de la perte de masse sera effectué sur les échantillons après chaque étape du procédé d'élaboration, une évaluation des retraits dimensionnels en diamètre et en longueur seront réalisées sur les échantillons après chaque étape du procédé d'élaboration, une observation de la microstructure des échantillons sera observée par microscope optique après chaque étape du procédé et enfin, les mesures des taux de porosité seront effectuées sur les échantillons après cuisson.

Du point de vue des caractéristiques thermiques : les mesures des diffusivités thermiques des échantillons seront réalisées dans les directions perpendiculaire et parallèle à la direction de l'extrusion. Les résultats obtenus devront être conformes à la norme et supérieurs à ceux des produits Kwilu-Briques.

Du point de vue des propriétés mécaniques : les valeurs moyennes des contraintes à la rupture en flexion et en compression seront déterminées par des essais de flexion et de compression sur plusieurs éprouvettes. Les résultats obtenus doivent être conformes à la norme et supérieurs aux produits Kwilu-briques et pourront être comparés à des résultats disponibles dans la littérature (Moutou Pitti et al. 2023).

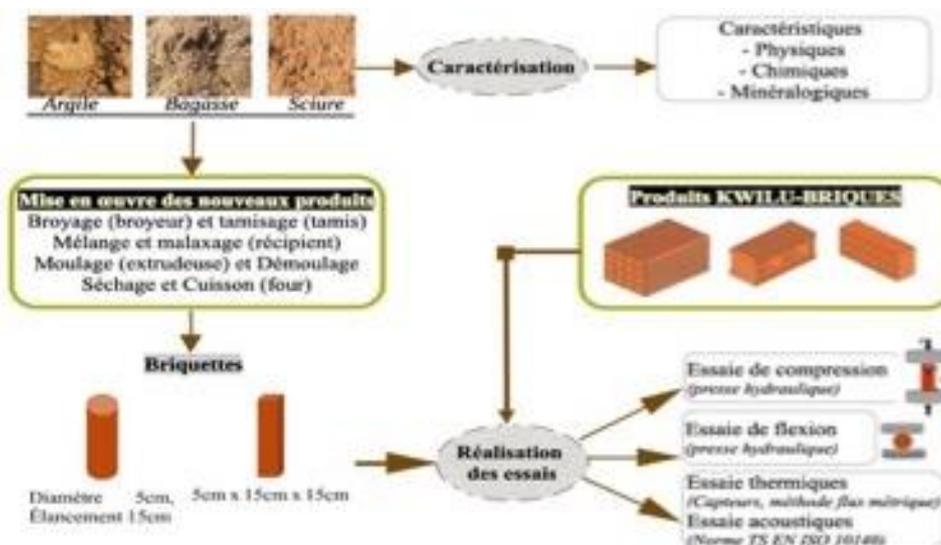


Fig. 1 : Processus de fabrication

Conclusion et perspectives

Les résultats issus des essais effectués seront intégrés dans un modèle numérique permettant de simuler différents scénarios tels que l'architecture du bâtiment, son implantation dans différents milieux naturels et géotechniques et le mode d'exploitation lié à l'usage du bâtiment.

Remerciements

Nous remercions le Gouvernement Français pour son soutien financier et l'entreprise Kwilu-brique qui met à notre disposition ses matériels, ses produits ainsi que ses procédés de production afin de nous permettre d'effectuer nos recherches.

Références

- Azama N., Mutonkole P. (2019) Réduction de la consommation énergétique des bâtiments en zones chaudes par le choix des matériaux de construction. 1ère Conférence Interuniversitaire Russe de Tambov State Technical University sur le thème "Science moderne : théorie, méthodologie et pratique". 12.19, Tambov, Fédération de Russie.
- Lewo N.B, Azama N. (2019) Impact de l'utilisation de matériaux de construction à base de ciment dans la construction des habitations implantées dans des localités à forte teneur en argile. Cas de la province du « Kongo Central » en RD Congo. 1ère Conférence Interuniversitaire Russe de Tambov State Technical University. 12.19, Tambov, Fédération de Russie.
- Moutou Pitti R., Ekomy Ango S., Soumbou S., Feldman Pambou Nziengui C. (2023) Conception et fabrication d'une brique adobe à partir des sciures de bois d'origine du bassin du Congo. Rentrée scientifique de l'Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics (INBTP), 02.23, Kinshasa RDCongo.
- ECOMAT (2022) 2ème Conférence des Eco-Matériaux en Afrique - CEMA'2022, 06.22, Saly, Sénégal. <https://cema2021.sciencesconf.org/>

De la valorisation d'une plante invasive (*Baccharis halimifolia*) vers l'écoconception d'un panneau bois local

BERTRAND Gaël^{1,2}, LACOSTE Clément¹, LE MOIGNE Nicolas¹, HOSTEQUIN Anne-Claire³, MAGNIN Arnaud³

¹Polymères, Composites et Hybrides (PCH), IMT Mines Alès, Alès

²Master Science du Bois, Université des Sciences de Montpellier

³Ateliers LUMA, Arles

gael.bertrand@etu.umontpellier.fr

Mots clefs : Panneaux, bois, fibres, colle, biocomposites, bio-adhésifs, valorisations

Contexte et objectifs

Baccharis halimifolia L. (Asteraceae) est un arbuste invasif au fort potentiel de développement sur le littoral camarguais. Les équipes des Ateliers Luma, en collaboration avec le centre de recherche C2MA de l'IMT Mines Alès sont à l'initiative de recherches qui permettraient de valoriser les broyats issus des campagnes d'arrachages de *B. halimifolia* en panneaux biosourcés et biodégradables d'usage non-structuraux. Dans le cadre d'un projet collaboratif, réalisé dans l'équipe Polymères, Composites et Hybrides (PCH), il a été possible de mettre au point un procédé expérimental permettant de fabriquer des panneaux de *B. halimifolia* en utilisant un liant biosourcé. Trois granulométries de broyats ont été thermo-compressées avec ce liant puis soumises à des essais de flexion 3 points pour évaluer leurs performances mécaniques. En complément, la qualité de l'interface fibre-liant a été évaluée par microscopie électronique à balayage. L'objectif est de mettre en lien les observations faites à l'échelle microstructurale et les résultats obtenus en essais mécaniques.

Matériel et méthodes

Caractérisation anatomique de B. Halimifolia

Un échantillon de *B. Halimifolia* a été arraché sur les sites des marais de Meyrannes. Sur cet individu ont été prélevés plusieurs coupes anatomiques correspondant à 3 niveaux d'unités de croissances différentes (structure mise en place par la tige au cours d'une période d'allongement ininterrompue).

Les échantillons sont donc : 3 coupes anatomiques à UC_n ; 3 coupes anatomiques à UC_{n-1} ; 3 coupes anatomiques à UC_{n-2} ou plus anciennes ; 3 coupes anatomiques de racines ; 3 coupes anatomiques de feuille.

Les coupes sont colorées au bleu de toluidine puis placées sur un montage entre lame et lamelle de verre afin d'être observées au microscope optique en lumière blanche, puis au microscope optique / numérique en lumière blanche. Les photographies sont prises numériquement depuis un poste informatique relié au microscope optique / numérique Olympus du département de biologie de l'université de Montpellier.

Préparation des fractions de broyats

Les fractions de broyats réceptionnées au laboratoire sont issues d'un broyeur agricole. Ces dernières sont à nouveau broyées au calibre 8 mm puis tamisées selon trois mélanges granulométriques :

- Mélange 1 : $0,5 \text{ mm} < x < 4 \text{ mm}$;
- Mélange 2 : $0,5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$;
- Mélange 3 : $2 \text{ mm} < x < 4 \text{ mm}$.

Préparation du liant

Pour chaque panneau, 84,4 grammes de liant sont mélangés à 477,8 grammes d'eau distillée dans un réacteur (1) à température ambiante. Ce mélange est ensuite placé dans un bain d'huile (2) puis chauffé avec un agitateur chauffant (3) jusqu'à 85°C (4) et jusqu'à épaississement (Fig. 1).

Fabrication des panneaux

Le processus de fabrication des panneaux (Fig. 2) se fait en 4 grandes étapes. L'encollage consiste à mélanger manuellement les fractions broyées de *B. halimifolia* avec le liant humide. Une fois encollé, le mélange est placé en étuve pendant 16 heures (une nuit) à 55°C . Lorsqu'il est sec, le mélange est placé dans un moule usiné en $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. Enfin, un contre moule de $29,5 \text{ cm} \times 29,5 \text{ cm} \times 0,33 \text{ cm}$ vient s'intégrer au moule pour obtenir un panneau d'une épaisseur finale de $0,67 \text{ cm}$ après l'étape de thermocompression.

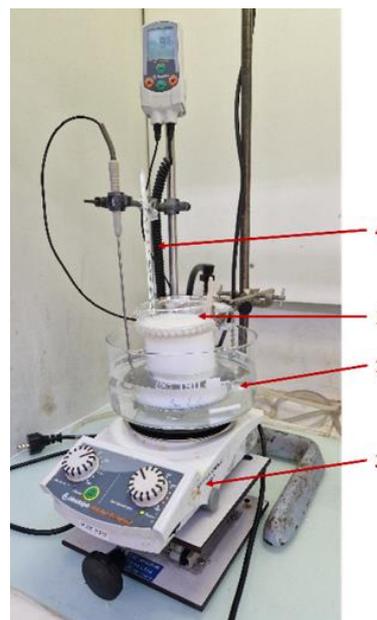


Fig. 1 : Montage sous sorbonne nécessaire à la préparation de la colle végétale. Un réacteur est chauffé dans un bain d'huile à l'aide d'un agitateur chauffant.



Fig. 2 : Processus de fabrication d'un panneau de *Baccharis halimifolia* depuis la phase d'encollage des fractions jusqu'à la thermocompression.

Le programme retenu pour la confection des panneaux de *B. halimifolia* (Tab. 1) est le suivant :

- **Palier 1** : 5 minutes de chauffe à une pression de 25 KN à 130°C ;
- **Palier 2** : 10 minutes de pression à 500 KN à 130°C ;
- **Palier 3** : 10 minutes de pression à 500 KN en refroidissement à 70°C ;
- **Palier 4** : 2 minutes de refroidissement à 25 KN à 70°C .

Tab. 1 : Nomenclature des panneaux de fractions de baccharis.

| Panneau | Mélange | Granulométrie | Paramètre étudié | Méthode |
|---------|-----------|---------------|------------------------|------------------|
| GR-AB-1 | Mélange 1 | 0,5 mm à 2 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| GR-AB-2 | | 0,5 mm à 2 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| GR-AB-3 | Mélange 2 | 0,5 mm à 4 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| GR-AB-4 | | 0,5 mm à 4 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| GR-AB-5 | Mélange 3 | 2 mm à 4 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| GR-AB-6 | | 2 mm à 4 mm | Granulométrie | Flexion 3 points |
| SE-AB-1 | - | 0,5 mm à 4 mm | Fabrication sans étuve | Flexion 3 points |

Seuls les panneaux en **gras** servent à déterminer la granulométrie optimale par essais de flexion 3 points.

Un suivi du taux d'humidité des fractions encollées est également réalisé au cours de l'étuvage. Chaque heure, environ 15g de fractions sont prélevées d'un mélange en séchage à l'étuve à 50°C puis leur teneur en eau est évalué à l'aide d'une balance infrarouge.

Fabrication du panneau sans temps d'étuve

Un panneau est fabriqué selon un protocole différent ; une poudre sèche est intégrée aux fractions de bois avec de l'eau. La quantité d'eau ajoutée correspond à une estimation du taux d'humidité présent dans les mélanges 1, 2 ou 3 après 13 heures d'étuve à 50°C. Ce panneau est moulé puis thermo compressé dans les minutes qui suivent l'encollage selon le même protocole et le même programme que pour les autres mélanges.

Caractérisation mécanique des panneaux

Afin de procéder à une caractérisation mécanique en flexion 3 points, le protocole qui est suivi est décrit par la norme NF EN 310 de juin 1993. Le banc de flexion qui est utilisé est un Zwick Roell. Cet essai permet de déterminer le module d'élasticité en flexion 3 points (noté E_m) et la résistance à la flexion (notée f_m). Les panneaux sont découpés sous forme d'éprouvettes dont les dimensions sont explicitées dans la norme NF EN 310. Les mesures sont : 6,7 mm (épaisseur), 40 mm (largeur), 184 mm (longueur).

Observation au microscope électronique à balayage des interfaces liant / fractions

Des échantillons de panneaux d'environ 5mm³ sont prélevés dans la zone de rupture suite aux essais mécaniques, puis placés dans la chambre sous vide du MEB. L'observation de ces interfaces peut permettre d'observer la qualité de la cohésion entre le liant et les broyats de *B. halimifolia*.

Résultats et discussion

Caractérisation anatomique de B. halimifolia

Sur l'échantillon UCn-1 (Fig. 3), les parenchymes de rayons sont visibles (3), ils peuvent varier entre unisérié (une seule cellule) et multisériés (jusqu'à 10 cellules). Du parenchyme paratrachéal est présent aux côtés des éléments de vaisseaux à disposition flammée. Ici, un troisième cerne est en formation (4).

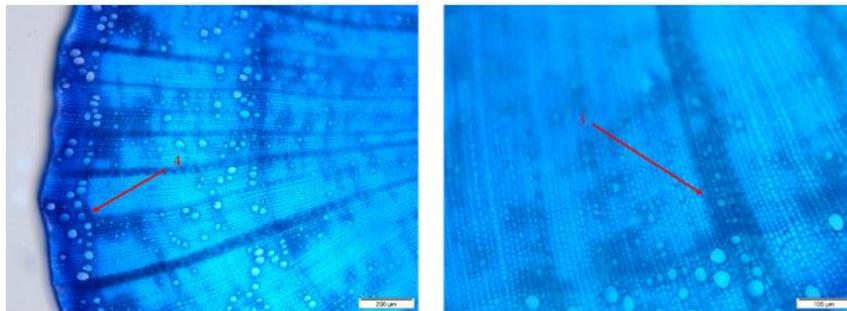


Fig. 3 : Coupe anatomique du bois seul de *B. halimifolia* à UCn-1. Cette coupe permet d'observer de larges rayons ainsi que la porosité du bois de *B. halimifolia*.

Des cristaux de sels ont été observés sur les feuilles de *B. halimifolia*. En effet *B. halimifolia* est une espèce halophyte facultative qui peut se développer sur des sols littoraux avec de forts taux de salinité, jusqu'à 33 g/l mais peut également pousser sur des sols à très faible taux de salinité (Fried et al. 2016). De plus, la présence de stomates traduit une capacité forte à gérer l'évapotranspiration par les feuilles et ainsi réagir au déficit hydrique auquel il peut être

confronté. Ces adaptations font de *B. halimifolia* une plante invasive avec un très fort potentiel de développement sur les littoraux et sur les parcelles côtières chaudes et tempérées.

Préparation des fractions de broyats

La préparation des fractions de *B. halimifolia* détermine la granulométrie des panneaux. De plus, la présence de fractions fines (0,5 mm à 2 mm) dans le mélange granulométrique peut favoriser la cohésion du panneau via l'interface liant / fraction. Ces petites particules peuvent prendre place entre les plus grandes et renforcer la compacité et la rigidité du panneau obtenu.

Fabrication des panneaux

La Fig. 4 montre l'évolution du taux d'humidité du mélange liant / fractions sur 24 heures à 50°C. Ce suivi a permis de déterminer que le taux d'humidité idéal du mélange pré-thermocpression est de 5 % à 20 % (Facteur 4 dû à l'imprécision de la mesure ; certaines particules sont encore très humides, d'autres très sèche après 12 heures en étuve).

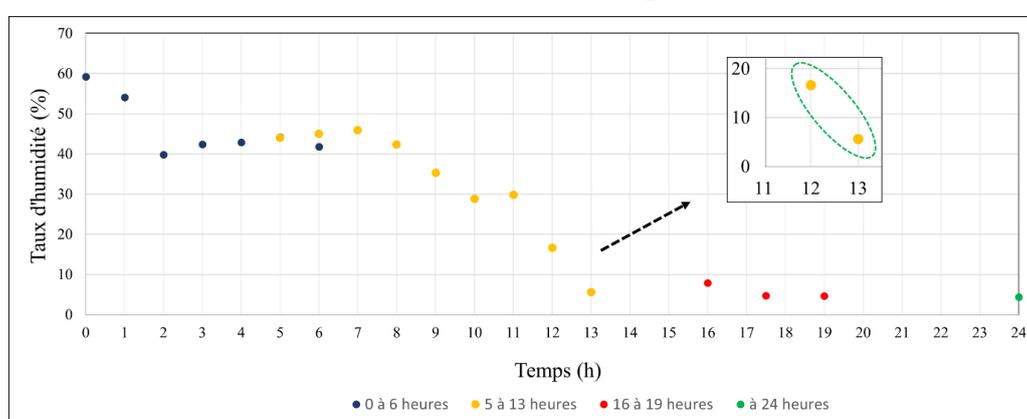


Fig. 4 : Suivi de l'évolution du taux d'humidité du mélange liant / fractions sur 24 heures à 50°C.

Le programme de thermopressage qui a été mis au point pour cette étude semble être très bien adapté au produit fabriqué (Fig. 5). Cependant il ne reproduit pas fidèlement un procédé industriel en semi-continu ou continu qui nécessiterait des optimisations vis-à-vis du mélangeage lors de l'encollage et du cycle de séchage.



Fig. 5 : (gauche) Utilisation d'un moule usiné permettant l'évacuation du surplus de vapeur pendant la phase de thermocompression. (droite) Panneau GR-AB-3 obtenu de granulométrie 0,5 mm à 4 mm.

Caractérisation mécanique des panneaux

Cette expérimentation a permis d'éliminer la granulométrie 2 mm à 4 mm (GR-AB-5 et GR-AB-6 issue du mélange 3, qui n'apparaît pas sur le Tab. 2) car il n'a pas été possible de la découper, les échantillons étant trop peu cohésifs impliquant un arrachage des fibres de plus grandes dimensions par la lame de scie circulaire.

D'après les résultats obtenus, le panneau GR-AB-2 est pourvu du meilleur module d'élasticité, 917,8 MPa, tandis que le panneau GR-AB-4 affiche la meilleure résistance à la flexion, 8 MPa. Cependant, il faut noter qu'aucune de ces valeurs n'est suffisante pour souscrire à l'exigence de la norme NF EN 310, soit 10,5 MPa pour les panneaux de particules de cette gamme d'épaisseur.

Tab. 2 : Récapitulatif des essais de flexion 3 points pour l'étude granulométrique.

| Granulométrie | | | | | |
|-----------------------------|---------|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|
| Éprouvette (panneau entier) | Mélange | Granulométrie | Masse volumique du panneau ρ (kg.m ³) | Module d'élasticité E_m (Mpa) | Résistance à la flexion f_m (Mpa) |
| GR-AB-1 | 1 | 0,5 mm à 2 mm | 1015,8 ± 42,7 | 803,9 ± 129,1 | 6,2 ± 1,1 |
| GR-AB-2 | | 0,5 mm à 2 mm | 1053,7 ± 51,5 | 917,8 ± 138,6 | 6,5 ± 0,2 |
| GR-AB-3 | 2 | 0,5 mm à 4 mm | 1035,1 ± 40,9 | 791,9 ± 49,1 | 7,3 ± 0,4 |
| GR-AB-4 | | 0,5 mm à 4 mm | 1027,1 ± 22,8 | 850,3 ± 118,8 | 8 ± 1 |
| Moyenne | | | | | |
| Norme EN 312 P2 | UF 10 % | 670 ± 25 | 1800 | 11 | 2,68 |

Les valeurs de module d'élasticité et de résistance à la flexion sont issues des moyennes obtenues pour chaque éprouvette testée (4 par panneau).

Les résultats obtenus pour le panneau sans étuvage préalable du liant, SE-AB-1, affichent des valeurs de module d'élasticité inférieures aux panneaux testés pour l'étude résumée dans le Tab. 3. La masse volumique est aussi plus faible mais reste acceptable vis-à-vis de la valeur exigée par la norme. Cette méthode de fabrication, bien qu'elle permette un gain de temps considérable, ne doit pas être priorisée.

Tab. 3 : Récapitulatif des essais de flexion 3 points pour l'étude mécanique comparative entre les panneaux fabriqués à partir de mélange fraction / liant étuvé, et les panneaux fabriqués à partir de mélange non étuvé.

| Sans étuve | | | | | |
|---|---------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| Éprouvette (lamelle extrait de panneau) | Granulométrie | Masse volumique du panneau ρ (kg.m ³) | Module d'élasticité E_m (Mpa) | Résistance à la flexion f_m (Mpa) | Module spécifique (Mpa.m ³ /kg) |
| SE-AB-1-1 | 0,5 mm à 4 mm | 746 ± 29 | 452 | 4,9 | 0,6 |
| SE-AB-1-2 | 0,5 mm à 4 mm | | 447 | 4,1 | 0,6 |
| SE-AB-1-3 | 0,5 mm à 4 mm | | 429 | 4,7 | 0,6 |
| SE-AB-1-4 | 0,5 mm à 4 mm | | 293 | 2,7 | 0,4 |
| Moyenne (du panneau) | | 746 ± 29 | 405 ± 75 | 4,1 ± 1 | 0,5 ± 0,1 |
| Norme EN 312 P2 | | 670 ± 25 | 1800 | 11 | 2,68 |

Observation au microscope électronique à balayage des interfaces liant / fractions

Les observations au MEB (Fig. 6) sont à mettre en lien avec les résultats obtenus lors de l'étude mécanique. En effet, l'étude des interfaces liant / fractions tendent à confirmer que l'enrobage des particules de bois de *B. halimifolia* est moins efficace pour la méthode sans chauffage préalable du liant ni étuvage du mélange fractions / liant (méthode 2) que pour la méthode avec étuve (méthode 1). Ces résultats montrent que la qualité de l'enrobage (épaisseur, distribution) lors de l'étape d'encollage des fractions avec le liant influence de façon significative les performances mécaniques des panneaux de *B. halimifolia*.

Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus à ce stade de l'étude montrent que les broyats de *B. halimifolia* peuvent être valorisés pour une utilisation en panneaux non-structuraux. Les performances mécaniques des panneaux obtenus avec un liant biosourcé montrent des performances proches des panneaux

de particules bois du marché. Cependant, l'utilisation d'un liant biosourcé ne doit pas compromettre les performances mécaniques du composite obtenu à moyen terme, nécessitant de poursuivre ces travaux pour évaluer leur durabilité en usage. De plus, il serait intéressant d'analyser l'impact potentiel de la teneur en sel du matériel végétal sur le phénomène de séchage/collage ainsi que l'impact sur la durabilité du panneau.

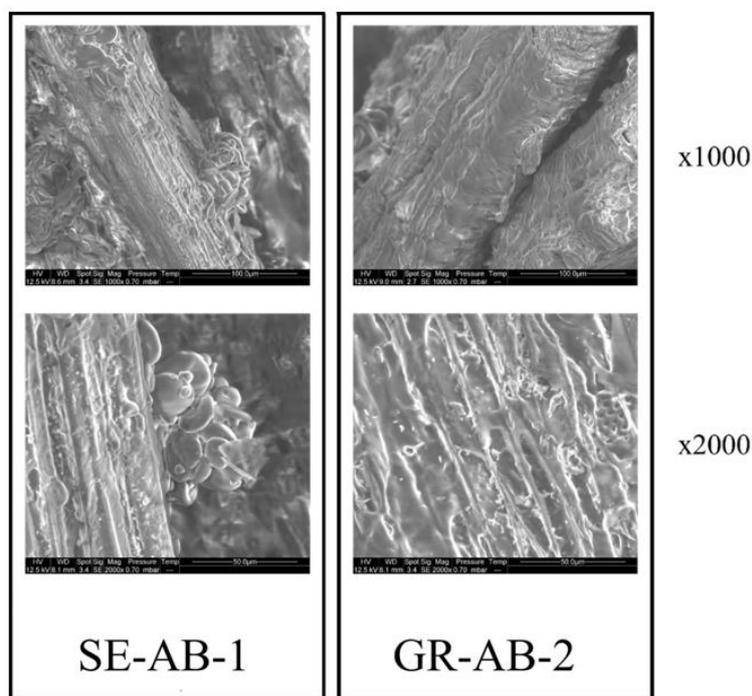


Fig. 6 : Photographies prises au MEB des échantillons de panneaux de *Baccharis*. A gauche, l'échantillon est issu d'un panneau fabriqué avec une poudre intégrée aux fractions de bois avec de l'eau. A droite, l'échantillon est issu du panneau GR-AB-2 fabriqué pour l'étude granulométrique avec un liant sous forme de solution visqueuse, puis enrobé et séché. Le mélange est placé en étuve et thermo-compressé à un taux d'humidité théorique compris entre 5 % et 20 %.

Remerciements

Je remercie particulièrement Clément Lacoste pour sa patience, ses remarques, ses aiguillages et nos discussions toujours instructives et bienveillantes. Nicolas Le Moigne pour ses indications pertinentes, censées, toujours cohérentes et constructives. Anne-Claire Hostequin pour son dévouement envers ce projet, sa curiosité, sa créativité, ses conseils et sa disponibilité. Arnaud Magnin pour son approche technique, ses réflexions et son engagement dans le projet.

Je tiens à remercier le laboratoire d'excellence de l'université de Montpellier, LabEx NUMEV de soutenir financièrement les ambitions pédagogiques du master sciences du bois notamment sur les déplacements évènementiels tels que le GDR.

Enfin, merci à Sandrine Bardet pour son accompagnement et son énergie mise au service du Master Science du Bois.

Références

Fried G., Cano L., Brunel S., Charpentier A. (2016) Monographs on Invasive Plants in Europe : *Baccharis halimifolia* L. Acta botanica Gallica : bulletin de la Société botanique de France 29. <https://doi.org/10.1080/23818107.2016.1168315>

Etude du comportement mécanique du bois en compression en fonction de la température et l'humidité : application aux sections résiduelles d'éléments en bois soumis à des incendies

DAHER Hussein^{1,2}, CARE Sabine¹, FORET Gilles¹, PAYET Loïc²

¹Laboratoire Navier, Université Gustave Eiffel, ENPC, CNRS (UMR 8205),
F-77455 Marne-la-Vallée, France

²CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne, France
hussein.daher@enpc.fr , loic.payet@cstb.fr

Mots clefs : Bois ; Température ; Humidité ; Eurocode 5 ; Compression axiale ; Module d'Young

Contexte et objectifs

Ces dernières années, des bâtiments en bois, allant du simple rez-de-chaussée aux Immeubles de Grandes Hauteurs (IGH), ont été construits dans le monde entier afin de favoriser des constructions à faible empreinte carbone et l'utilisation des ressources forestières. La prévision de la résistance au feu des éléments en bois soumis à des incendies a gagné en importance pour améliorer la crédibilité des bâtiments en bois en cas de feu et afin de concevoir des structures appropriées.

L'enjeu actuel est de mieux comprendre quelles sont les propriétés résiduelles dans les sections des éléments de structure en bois non carbonisées qui peuvent être soumises à des températures jusqu'à 100°C-150°C. En ce qui concerne les paramètres qui affectent les propriétés mécaniques des éléments en bois exposés à la chaleur du feu, la température n'est pas la seule variable importante, la teneur en eau l'est également. En effet, selon la littérature, la teneur en eau dans la section résiduelle (section non carbonisée) peut être variable car il existe des processus complexes comme la vaporisation, le transfert et la condensation de l'eau (Gerhards 1982, White 1981, Woodhandbook 1987).

Selon l'approche proposée dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-2 :2005), la résistance en compression à 100°C est inférieure de 25% à celle à 20°C, mais la teneur en eau dans le bois n'est pas précisée. Des essais préliminaires menés en 2020 au CSTB (Manthey 2020) ont montré pour la plage de température 20-100°C qu'au-delà de la température, la résistance en compression était surtout affectée par la teneur en eau du bois. A 100°C, la résistance en compression, après stabilisation de la masse, est presque identique à la résistance initiale à 20°C. Elle est d'environ 60% de la résistance initiale pour une éprouvette avec une teneur en eau d'environ 10%.

Le comportement thermo-hygro-mécanique du bois est donc complexe et dépend de nombreux facteurs tels que l'essence de bois, le type de bois (bois massif ou reconstitué), la teneur en eau, la température et les contraintes mécaniques auxquelles il est soumis. Le présent travail étudie l'évolution des propriétés mécaniques du bois (résistance en compression et module d'Young longitudinal) en fonction de la température et de l'humidité afin de mieux comprendre le comportement du bois, pour une bonne utilisation du bois dans les ouvrages qui peuvent être soumis à des incendies.

Matériels et méthodes

Dans cette section, nous présentons les matériaux et les approches employés pour évaluer l'influence de la température entre 20°C et 150°C et de la teneur en eau sur la résistance à la compression axiale (sens des fibres) ainsi que sur le module d'Young.

Les expérimentations ont été menées de deux manières distinctes. Tout d'abord, nous avons utilisé du bois massif (bois de Sapin) provenant de diverses sources, dans le but d'étudier les effets de la variabilité du bois. Ensuite, nous avons utilisé du lamellé-collé de classe GL24H conforme à la norme NF EN 14080, fabriqué à partir de bois d'épicéa (noté BLC), en faisant varier les conditions thermiques et hydriques.

Bois massif (Sapin)

Le protocole mis en place (P_0) considère un contrôle simultané de l'humidité et de la température des échantillons de Sapin. Pour ce faire, des échantillons (section S_0 , dimensions 35x35x80 mm³) sont placés dans des dessiccateurs contenant une solution saline saturée afin de contrôler l'humidité relative. Les essais présentés dans ce travail sont réalisés à température ambiante (20°C) pour 5 niveaux de teneur en eau différents. Les essais réalisés avec une teneur en eau d'environ 11%, servent de référence pour les autres niveaux de teneur en eau. Toutes les données sont ensuite normalisées par rapport à cette référence (et aussi par rapport à la densité pour tenir compte de la variabilité du matériau bois d'un échantillon à l'autre).

Bois lamellé-collé (BLC)

Les essais sur le lamellé-collé (GL24H) ont été réalisés selon plusieurs protocoles pour étudier son comportement à différentes températures (20°C, 60°C, 100°C et 150°C), teneurs en eau, et pour différentes dimensions (sections : S_1 , S_2 et S_3 , respectivement avec les dimensions suivantes : 50x50x100mm³, 97x92x200mm³, 187x198x400mm³). Le premier protocole P_1 , consiste en des essais de compression à la température ambiante 20°C, dans 2 états hydriques (état initial avec une teneur en eau d'environ 11% et état sec après étuvage à 103°C). Ces essais ont été effectués pour servir de référence lors de l'interprétation des résultats obtenus lors des autres protocoles. Pour les autres températures (60°C, 100°C ou 150°C), les échantillons sont placés dans une étuve pendant des durées différentes en fonction des conditions d'humidité ou de température requises, puis les essais mécaniques ont été réalisés (à l'aide de thermocouples, nous avons vérifié que, pendant la durée de l'essai mécanique, la température dans les échantillons restait identique à celle à la sortie de l'étuve). Dans le cadre du protocole P_{1bis} , des essais de compression sont réalisés en considérant une même perte de masse de 10%, après étuvage pour chaque section et température. Le protocole P_2 visait à maintenir une température homogène tout au long de la hauteur de la section. Finalement, le protocole P_3 consistait en des essais de compression à différentes températures (60°C, 100°C et 150°C), après des durées variables d'échauffement dans l'étuve (15min, 25min, 40min, 50min et 60min). Les résultats obtenus pour tous les protocoles ont été normalisés par rapport aux résultats à 20°C, ainsi que par la densité des échantillons (densité estimée en tenant compte de la teneur en eau moyenne après étuvage).

Résultats et discussion

Essais sur le bois massif, effet de la teneur en humidité à température ambiante

La Fig. 1 donne les résultats des résistances et modules longitudinaux pour le bois de sapin. De manière attendue, les propriétés mécaniques baissent avec la teneur en eau et pour le module longitudinal, la correction de Guitard (Guitard 1987) est en effet vérifiée. Ces résultats sont discutés en fonction de l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques des parois cellulaires.

Des essais seront réalisés sur le lamellé-collé (GL24H) à 20°C et jusqu'à 100°C dans la suite du travail avec la section S_1 afin de discuter de la variabilité de la loi de Guitard pour du bois reconstitué (BLC).

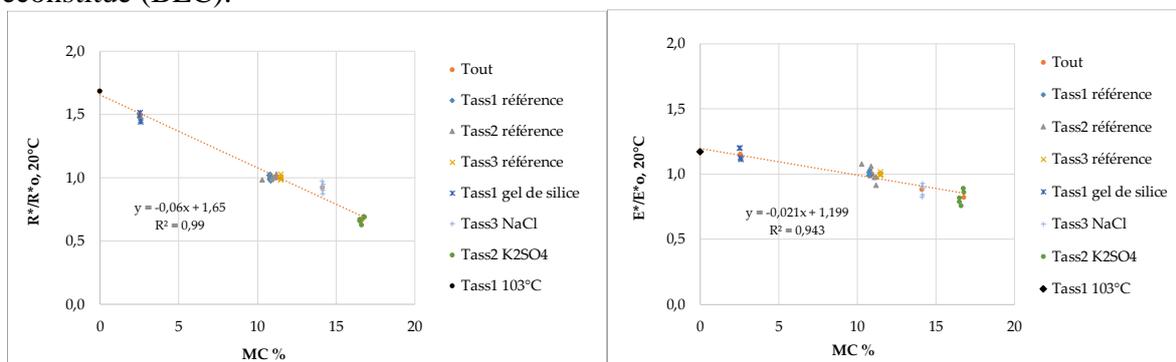


Fig. 1 : Résistances en compression et Modules d'Young du Sapin (de 3 provenances différentes notées Tass1, Tass2 et Tass3) à différentes teneurs en eau (MC%) et à température ambiante (20°C) et normalisés par rapport à la référence (notée avec l'indice 0) et la densité (désignée par *). 5 échantillons sont testés par conditions hydriques.

Essais sur le lamellé-collé (P_1 , P_{1bis} et P_2), effet de la température (20°C à 150°C) pour les sections S_1 , S_2 et S_3

La Fig. 2 montre les résultats obtenus pour la section S_1 à différentes températures et pour les protocoles P_1 , P_{1bis} et P_2 . Les propriétés mécaniques augmentent avec la température par rapport aux essais de référence à 20°C, puis diminuent par la suite. La diminution des propriétés mécaniques observée est plus marquée à 60°C pour la section S_1 , tandis que pour les sections S_2 et S_3 , cela se produit autour de 100°C (résultats non présentés ici). Ces variations peuvent être expliquées par différents facteurs tels que la diminution de la teneur en eau du bois, des dégradations des éprouvettes (eg. fissuration du bois ou délaminage entre lamelles du BLC) et des dégradations chimiques. Les différences entre les sections S_1 , S_2 et S_3 peuvent être dues à des effets d'échelle.

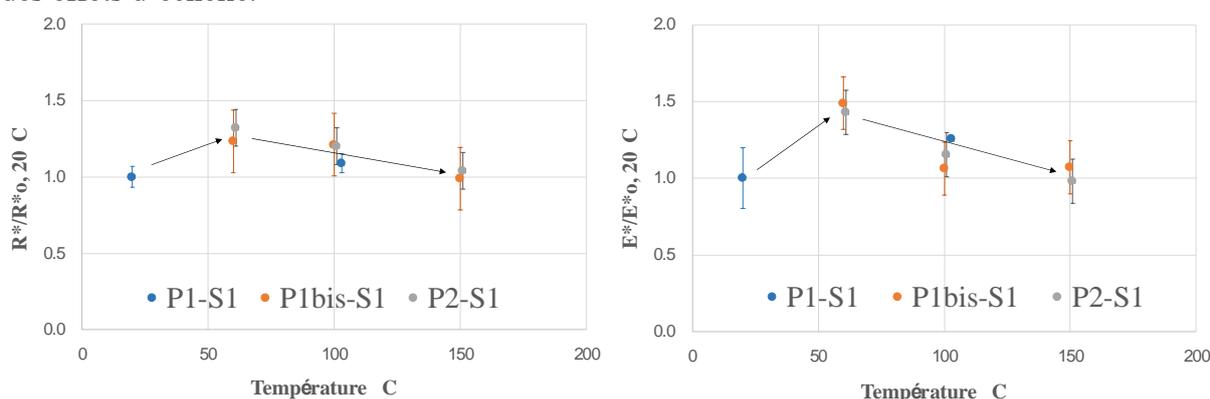


Fig. 2 : Résistances en compression et Modules d'Young à différentes températures (20-150°C) pour les trois protocoles P_1 , P_{1bis} et P_2 et pour la section S_1 , pour le bois BLC. Les résultats sont normalisés par rapport à l'état de référence (notée avec l'indice 0) et la densité (désignée par *). 5 échantillons sont testés par température.

Essais sur le lamellé-collé (P_3), effet de la température (20°C à 150°C) avec différentes durées d'échauffement (15min à 60min) pour les sections S_1 , S_2 et S_3

Le protocole P_3 consistait à étuver les échantillons pendant des durées variables, comme indiqué précédemment. Les essais réalisés montrent que les résistances en compression ont tendance à diminuer pour les trois sections étudiées et les trois températures d'étuvage en fonction de la

durée d'étuvage (résultats non montrés ici). L'ensemble des résultats est discuté en fonction des pertes de masse après étuvage, des gradients thermiques, ainsi que des gradients hydriques induits lors de l'étuvage. En particulier, il est proposé une discussion sur les modes de rupture des échantillons qui diffèrent pour ce protocole par rapport aux autres protocoles (écrasement aux extrémités au lieu de fissures de cisaillement). Ces différences sont expliquées par rapport aux gradients hydriques observés dans les échantillons.

Conclusions et perspectives

Ce travail a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques, à savoir les résistances et les modules d'Young, de deux types de bois en fonction de la teneur en eau et de la température. D'une part, nous avons étudié le bois parfait (i.e. sans défauts), à température ambiante, en faisant varier la teneur en eau. D'autre part, nous avons analysé le bois lamellé-collé à différentes teneurs en eau en fonction de la température. Les résultats de notre étude ont révélé un effet opposé de la température et de la teneur en eau sur la résistance et la rigidité du bois.

Pour aborder la problématique liée au comportement mécanique des éléments en bois exposés à des incendies, en particulier pour les sections non carbonisées, il s'avère nécessaire de caractériser ses propriétés à des niveaux d'humidité plus élevés. Pour ce faire, nous prévoyons de mener des essais sur des échantillons de section S_1 (BLC), avec des essais similaires effectués sur les sections S_0 en bois de Sapin, en faisant varier les niveaux d'humidité et en exposant les échantillons à des températures approchant les 100°C. L'objectif de ces essais est de développer une relation qui permettra de décrire comment les propriétés mécaniques, telles que la résistance et le module d'Young, dépendent de la température et de la teneur en eau du bois. Enfin, des essais au feu seront réalisés sur des poutres dans différentes conditions et seront discutés à partir des résultats présentés ici. Ces travaux serviront de base pour intégrer les propriétés thermo-hygro-mécaniques dans des modèles de calcul couplés, lesquels pourront être validés grâce aux essais au feu réalisés sur les poutres.

Références

Eurocode 5 (2005) Conception et calcul des structures en bois, NF EN 1995-1-1,2.

Gerhards C.C (1982) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood, *Wood Fiber* (1):4-36.

Guitard D (1987) Mécanique du matériau bois et composites, Cépaduès.

Manthey M (2020) Rapport d'essais n° EEM/EA2R 2026087828, Etude de la résistance en compression en fonction de la température du matériau bois – épicéa, CSTB, France.

White R.H, Shaffer (1981). Transient moisture gradient in fire-exposed wood slab. *Wood and Fiber Science*. 13(1): 17-38.

Wood Handbook (1987) Wood as an engineering material, The Laboratory N°72, Department of Agriculture, United states.

Mise en évidence par haubanage de la réponse thigmomorphogénétique de deux clones d'hévéa

ENGONGA EDZANG Arnaud^{1,2}, GRIL Joseph^{1,2}, MOUTOU PITTI Rostand^{2,3}
BADEL Eric¹

¹Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000 Clermont–Ferrand, France

²Clermont Auvergne Université, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

³CENAREST, IRT, Libreville, Gabon
arnauld.engonga-edzang@inrae.fr

Mots clefs : *Hevea brasiliensis* ; vent ; acclimatation ; rigidité de flexion

Contexte et objectifs

Les dégâts liés au vent représentent un problème majeur pour la production de latex en hévéaculture. 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). Les plantations industrielles d'hévéas sont organisées en parcelles monoclonales, ce qui a permis de mettre en évidence (à travers des observations) des différences interclonales de sensibilité à la casse. Aujourd'hui, les plants de culture sont sélectionnés pour leur productivité en latex, leur résistance aux maladies, leur croissance rapide, etc. ; mais aucun paramètre mécanique de sensibilité à la casse au vent n'a jamais été intégré dans les critères de choix du fait du manque d'outils adaptés pour leur évaluation par les sélectionneurs. Or, il a été démontré au cours de ces dernières décennies que la réaction des arbres face au vent n'est pas qu'une réaction mécanique passive mais bien un processus biomécanique : les arbres sont capables de réagir de manière active à des vents exceptionnels, en ajustant leur croissance (primaire et secondaire) pour mieux résister. Cette modification de la croissance sous l'effet des charges mécaniques externes (charge due au vent) est connue sous le nom de thigmomorphogenèse (Telewski et Jaffe 1986). Elle a lieu lorsque l'arbre est soumis à des coups de vents d'intensité relativement forte mais sans dommages. Les déformations de la tige (des branches charpentières et racines) sont perçues (Coutand et al. 2009, Moullia et al. 2015) et cette perception conduit à une réduction de la croissance en hauteur d'une part, à une stimulation de la croissance secondaire de la tige et des racines d'autre part. Tous ces changements de l'arbre suite aux stimuli mécaniques dus au vent ont un caractère bénéfique, car ils permettent à l'arbre de réduire sa sensibilité aux dommages dus au vent. Par ailleurs, des méthodes efficaces d'évaluation de cette capacité d'acclimatation ont été développées aussi bien sur des arbres adultes que sur des jeunes plants (Bonnesoeur et al. 2016, Niez et al. 2019). Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à variabilité interclonale de la capacité d'acclimatation de l'hévéa. Il s'agit ici de comparer la capacité d'acclimatation des clones IRCA825 et IRCA41 reconnus très productifs mais dont la sensibilité à la casse au vent est réputée contrastée (le IRCA825 sensible et le IRCA41 résistant à la casse). Pour ce faire, nous avons mis en place un dispositif d'haubanage dans des plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire. Le haubanage supprime les déformations du tronc dues au vent et ainsi à annuler le processus d'acclimatation mécanique. 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 et à terme la module de rupture.

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 Côte d'Ivoire (4°40'41.4''N, 7°5'28.7''O). Dans ces parcelles, nous avons sélectionné 20 paires d'arbres de chaque clone. Les arbres constituant une paire étaient situés côte-à-côte et dans la même ligne comme le montre la Fig. 1a. Le dispositif expérimental était constitué de 20 paires d'arbres IRCA825 et 20 paires d'arbres IRCA41. Dans chaque paire nous avons haubané un arbre (Ha) et laissé un témoin non-haubané (NHa), soit un total de 40 arbres NHa et 40 arbres Ha. Les arbres sélectionnés avaient des troncs droits pour faciliter le haubanage et des circonférences initiales de 50 cm en moyenne (correspondant à la circonférence de mise en saignée pour la production de latex).

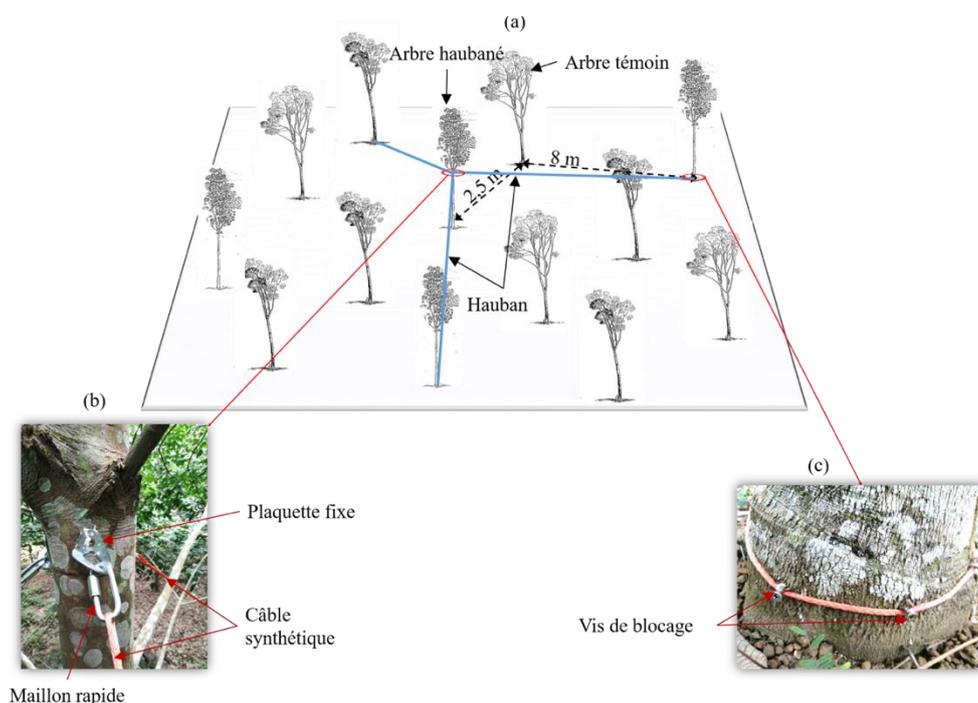


Fig. 1 : a. Schéma du dispositif d'haubanage. b. Zoom de la zone de fixation du hauban sur le tronc dans la partie basse du houppier. c. Zoom de la zone d'ancrage du hauban au pied des arbres voisins.

Le haubanage mis en place était constitué d'un système de 3 sangles à cliquet de 5 m de longueur ($F_{rupture} = 1500$ daN), 3 câbles synthétiques de 8 mm de diamètre (COUSIN TRESTEC, Sequorope, $E = 92$ GPa, $F_{rupture} = 6500$ daN), 3 maillons rapides de 6 mm de diamètre, 3 plaquettes fixes en acier de 8 mm d'épaisseur et des vis inoxydables (Fig. 1b et 1c). Après la mise en place du dispositif en décembre 2020, un suivi de la croissance secondaire de ces arbres a été mis en place tous les 6 mois à 1,70 m du sol.

Des essais de flexion sur pied ont été effectués après 28 mois de suivi de croissance, pour caractériser la rigidité de flexion EI des arbres issus des deux traitements (arbres NHa et Ha) et leur module d'élasticité MOE. Ces essais ont été effectués à l'aide d'un ensemble d'équipement (Fig. 2) constitué d'un câble synthétique (8 mm de diamètre et 6500 kg de capacité) placé dans le houppier (à 6 à 8 m selon la hauteur totale de l'arbre) de l'arbre à tester. Ce câble est relié à un dynamomètre, puis à un tire-câble qui est ancré au pied d'un autre arbre et qui permet de fléchir l'arbre (Fig. 2). Les déformations induites par le fléchissement 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 nous sommes appuyés sur la méthode d'analyse décrite par Engonga Edzang et al (2022).

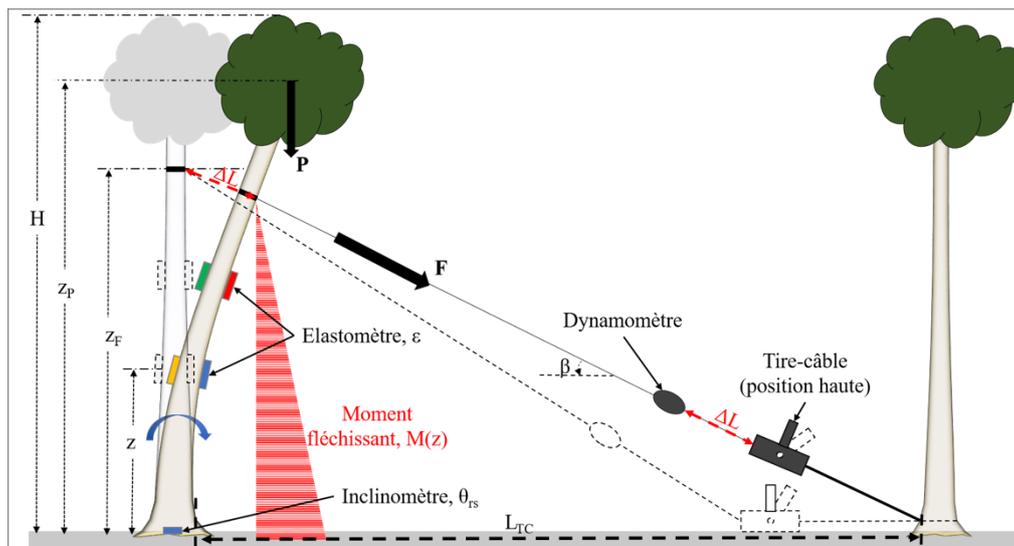


Fig. 2: Schéma du test de flexion non destructif, avec la position des différents capteurs. H hauteur totale de l'arbre, z_F hauteur au point de fixation du câble sur l'arbre, z_P hauteur du centre de gravité de la partie au-dessus de z_F , β angle du câble avec l'horizontale, L_{TC} distance de l'arbre au point d'ancrage du tire-câble à la base de l'arbre voisin, ϵ déformation mesurée par l'élastomère, θ_{rs} rotation du système racine-sol mesurée par l'inclinomètre, F force appliquée par le tire-fort, P poids du houppier, ΔL raccourcissement de la longueur du câble.

Résultats et discussion

Le suivi de croissance effectué sur les arbres NHa et Ha nous a permis de vérifier l'efficacité du dispositif de haubanage qui se traduit par la réduction de la croissance des arbres Ha. Il nous a également permis d'évaluer pour la première fois la capacité des clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41 à percevoir les sollicitations mécaniques et à y répondre par les processus thigmomorphogénétiques. Chez le clone IRCA825 (Fig. 3), nous avons observé une différence de croissance de +33% entre les arbres Ha (soit une croissance de 6,3 cm en périmètre) et NHa (soit une croissance de 12,3 cm en périmètre) après 28 mois de traitement. Cette différence de croissance entre les arbres issus des deux traitements est typique d'une absence de perception de stimulations mécaniques dues au vent chez les arbres Ha. On observe également les effets du haubanage chez les clones IRCA41, avec une différence de croissance de +17% (Fig. 4) entre les arbres Ha (soit une croissance de 9,9 cm en périmètre) et Ha (soit une croissance de 11,6 cm en périmètre) sur la même période.

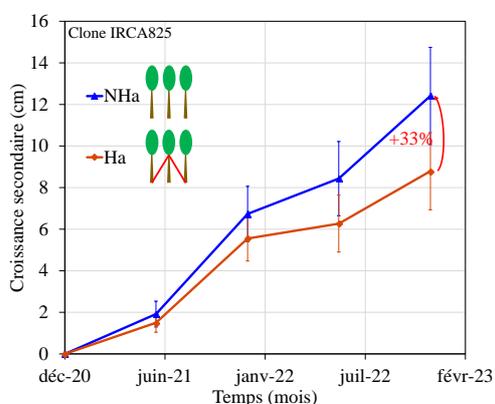


Fig. 3 : Croissance secondaire moyenne du clone IRCA825 après 28 mois de traitement d'expérimentation (mesure du périmètre à 1.7 m)

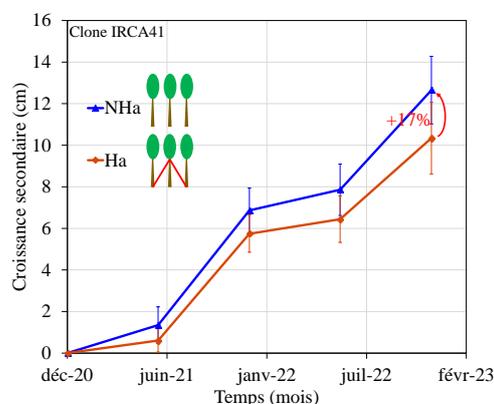


Fig. 4 : Croissance secondaire moyenne du clone IRCA41 après 28 mois de traitement d'expérimentation (mesure du périmètre à 1.7 m)

Comme on pouvait s'y attendre, la différence de croissance secondaire observée se traduit par une plus forte rigidité de flexion des arbres non-haubanés comparativement aux arbres haubanés. Les histogrammes de la Fig. 5 montrent des différences de EI entre les arbres NHa et Ha de l'ordre de 26% chez le clone IRCA825 et de 20% chez le clone IRCA41. Les effets du haubannage sur les propriétés du bois vert sont un peu plus contrastés entre les deux clones. En effet, les histogrammes de la Fig. 6 montrent, chez le clone IRCA825, qu'il n'y a pas de différence nette de MOE entre les arbres NHa et Ha (soit 5%, avec $p=0,365$). Chez le clone IRCA41 en revanche, on observe une différence significative de MOE (avec $p=0,017$) de l'ordre de 9% entre NHa et Ha. Ainsi, l'absence de perception de stimulations mécaniques s'est traduit principalement par une réduction importante de la croissance secondaire chez le clone IRCA825. Chez le clone IRCA41, cette absence de perception s'est traduite par une réduction de la croissance secondaire avec une modification des propriétés du bois.

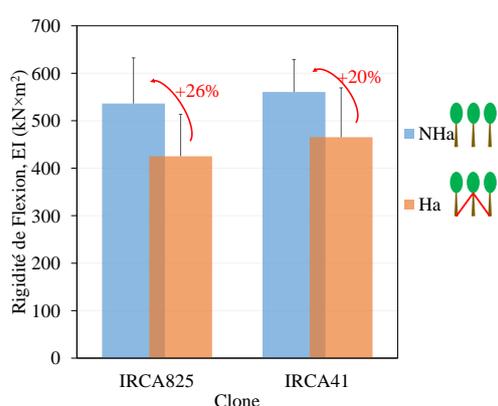


Fig. 5 : Rigidité de flexion mesurée sur pied à 1,7 m sur les clones IRCA825 et IRCA41

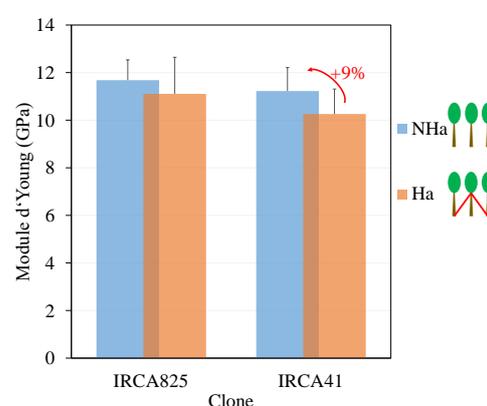


Fig. 6 : Module d'élasticité du bois vert mesuré sur pied à 1,7 m sur les clones IRCA825 et IRCA41

Conclusion

Ce travail a permis de montrer que les clones d'hévéa IRCA825 et IRCA41 sont capables de percevoir les stimulations mécaniques dues au vent et d'y répondre. On note néanmoins des stratégies différentes d'acclimatation au vent entre ces deux clones. L'acclimatation au vent chez le clone IRCA825 (réputé sensible à la casse au vent) semble se traduire par une augmentation importante de la croissance secondaire. Chez le clone IRCA41 (réputé résistant à la casse au vent) en revanche, l'acclimatation au vent semble se traduire à la fois par une augmentation de la croissance secondaire mais aussi par une modulation des propriétés de son bois. Dans la suite de cette expérimentation de haubannage des arbres, il serait également intéressant d'évaluer les effets de ce traitement sur la résistance à la rupture des tiges et celui du bois chez les deux clones.

Remerciements

Ces travaux font partie du projet « Vent Debout » financé par l'IFC (Institut Français du Caoutchouc) et les sociétés membres Michelin, SIPH et Socfin.

Références

Bonnesoeur V., Constant T., Moulia B., Fournier M. (2016) Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds. *New Phytol* 210, 850–860. <https://doi.org/10.1111/nph.13836>.

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.

Coutand C., Martin L., Leblanc-Fournier N., Decourteix M., Julien J.-L., Moulia B. (2009) Strain Mechanosensing Quantitatively Controls Diameter Growth and *PtaZFP2* Gene Expression in Poplar. *Plant Physiol.* 151, 223–232. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138164>.

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>.

Engonga A., Badel E., Gril J., Moutou Pitti R. 2022. Caractérisation mécanique de produits issus du déroulage de peupliers agroforestiers. 11^{ème} Journées scientifiques du GDR Sciences du Bois. Nice. 16-18 Nov. 2022 [hal-04136908v1](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04136908v1)

Moulia B., Coutand C., Julien J.-L. (2015) Mechanosensitive control of plant growth: bearing the load, sensing, transducing, and responding. *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00052>.

Niez B., Dlouha J., Moulia B., Badel E. (2019) Water-stressed or not, the mechanical acclimation is a priority requirement for trees. *Trees* 33, 279–291. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1776-y>.

Telewski F.W., Jaffe M.J. (1986) Thigmomorphogenesis: Anatomical, morphological and mechanical analysis of genetically different sibs of *Pinus taeda* in response to mechanical perturbation. *Physiol Plant* 66, 219–226. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb02412>.

Tropical agro-wastes for environmentally friendly non-load bearing bio-composites and comparative analysis with wood panels

MANSOUR Souha^{1,2}, VIRETTO Amandine^{1,2}, THEVENON Marie-France^{1,2},
BRANCHERIAU Loïc^{1,2}

¹CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

²BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

souha.mansour@cirad.fr

Keywords: tropical biomasses from West Africa, agricultural waste, biocomposite materials

Context

This work is part of the BIO4AFRICA project (H2020-No 101000762) which aims to diversify incomes in rural areas of Africa through sustainable and locally replicable solutions. The project focuses on developing technologies adapted to the environment and improving traditional techniques in African rural contexts with the local biomass available to develop bio-sourced materials for habitat.

In this context, five agricultural residues issued from Côte d'Ivoire and Senegal were selected to produce composite panels for building applications as non-load-bearing materials. The selected biomasses are oil palm empty fruit bunches, rice husks, cocoa pods, millet stalks, Typha. All the listed biomasses have no nutritional value and their use in such applications is beneficial, first economically and second to reduce waste and solve the induced health and environmental problems (Velooso et al., 2021); they are left on plantation sites (Abdul et al., 2012) which is the main cause of many diseases in the Western Africa area. They are available in large quantities, seasonal, and present different inherent properties.

Objectives

The objective of this study is the development of materials that represent environmental responsibility and are well-suited for use in tropical climates. It is important to take into consideration the significance of creating durable materials capable of withstanding the challenging conditions often found in tropical regions. Equally important, we are committed to minimizing the environmental impact associated with the entire production chain of these materials. This encompasses sourcing sustainable raw materials, employing eco-friendly manufacturing processes, and implementing waste reduction strategies.

This study is separated into three parts. Firstly, the characterization of the biomasses, then the fabrication and characterization of the composites, all while studying the effect of fiber/binder ratio and the intrinsic properties of the biomasses. Secondly, the role of the particle size will be studied and its effect on the panels' properties. Lastly, the research will explore the possibility of substituting the traditional binder used in the first two parts, which is melamine urea formaldehyde, with bio-sourced binders, ultimately striving for the development of 100% bio-sourced composites.

All the panels produced during this work will be compared with commercial wood panels used at the moment as non-load-bearing materials in the habitat sector. Characterization tests will be conducted on both the biocomposites produced and the wood panels to facilitate a comprehensive and distinct comparison between the two.

Material and methods

Biomass preparation

The biomasses sourced from Senegal and Ivory Coast (Fig. 1) underwent an initial drying process at 80°C for 24 hours to remove moisture content. Following this, they were subjected to milling using the Retsch SM100 mill with a 6 mm sieve. Due to the large size of these materials, this milling step was essential to reduce the size for the analysis of the biomasses and their incorporation in the composites.

Biomass characterizations

The characterization process involved several distinct steps. Initially, the biomasses underwent a sieving procedure using the Endecotts sieve shaker model EFL 2000 (sieve from 5 mm to 0.1 µm). This sieving aimed to establish a granulometric distribution, which holds significance for the subsequent phase of the study.

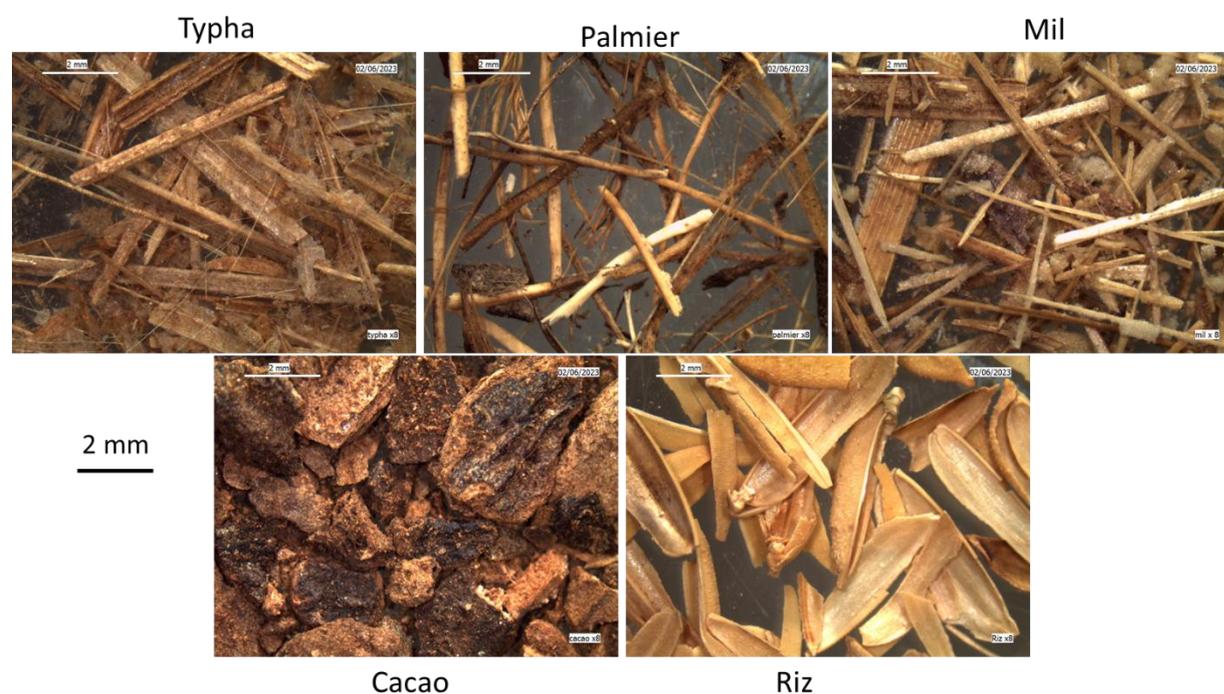


Fig. 1 : Microscopic view of the five biomasses (x8)

Following this, a thermogravimetric analysis was conducted using the Mettler Toledo Thermal Analysis instrument. This analysis involved subjecting the biomasses to a temperature range from 30 to 800 °C, with a heating rate of 10 °C/min, in two different atmospheres: air and nitrogen. The third test encompassed the determination of chemical composition through the ANKOM 200 fiber analyzer. To prepare for this assessment, the biomasses were ground to a size of 1 cm and then placed in filter bags. This procedure facilitated the determination of cellulose, hemicellulose, and lignin quantities and ratios in the materials. In addition to these major components, ash and humidity contents were also evaluated to determine the global chemical composition. Subsequently, Near-infrared spectroscopy, performed using PerkinElmer's Spectrum Two™ equipment, was employed to study the constituents of the fibers. A correlation could be made between these two methods which determine the chemical composition. To assess durability in the face of termite infestation, a dedicated screening test was conducted on raw biomass according to the method of Boer et al. (2021). Finally, the last carried out analysis on the produced grounded fibers will be the measurement of color.

Composites formulation

A heating hydraulic press (MIB, 100T) will be utilized for the production of panels measuring 40×40×1 cm. The grounded fibers were blended with Melamine Urea Formaldehyde (MUF) as binder which requires a temperature of 120°C to react.

Expected results

Following the fabrication of the panels, an extensive characterization process will follow, delving into various aspects as physico-chemical, mechanical, thermal and biological properties. These include an examination of their density, porosity, coloration, resistance to termites and fungi, thermal conductivity, fire resistance, mechanical strength, acoustic properties, and their response to water absorption. It is anticipated that the results obtained will likely differ from those observed in the case of wood panels; however, this comparative analysis will elucidate the distinctions between the two types of composite materials.

Regarding the fiber-to-binder ratio, it is anticipated to range between 80/20 and 60/40, with preliminary indications suggesting that the 80/20 ratio may yield more efficient outcomes. It is essential to note that particle size and the nature of the biomass used will significantly influence the final properties of the biocomposite materials.

In the subsequent phase, natural binders will be incorporated in order to replace MUF, but the expectation is not necessarily that they will outperform. Instead, the aim is to assess if the values achieved are within a close range of efficiency. If this proves to be the case, the preference will lean toward the utilization of a 100% bio-sourced material, aligning with sustainability goals.

References

- Abdul H.P.S., Jawaid M., Hassan A., Paridah M.T., Zaido A. (2012) Oil Palm Biomass Fibres and Recent Advancement in Oil Palm Biomass Fibres Based Hybrid Biocomposites. Composites and Their Applications, June 2014. <https://doi.org/10.5772/48235>
- Boer F.D., Valette J., Commandré J., Fournier M., Thévenon M. (2021) Slow Pyrolysis of Sugarcane Bagasse for the Production of Char and the Potential of Its By-Product for Wood Protection. *Journal of Renewable Materials*, 9(1), 97–117. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.013147>
- Veloso M.C.R., Scatolino M.V., Gonçalves M.M.B.P., Valle M.L.A., de Paula Protásio T., Mendes L.M., Junior J.B.G. (2021) Sustainable valorization of recycled low-density polyethylene and cocoa biomass for composite production. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32810–32822. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13061-y>

Modélisation des déformations de placages et contreplaqués

KACHOUH Cyril¹, GIRARDON Stéphane¹, DENAUD Louis¹,
MARCEL-MATHEY Thibaud¹, VIGUIER Joffrey¹

¹Laboratoire des Matériaux et Procédés (LaBoMaP) – EA 3633
caa.kachouh@gmail.com

Mots clés : Bois ; Modélisation ; Déformation ; Contreplaqué ; Ondulation ; Déroulage

Contexte

Pour de nombreuses applications, l'usage du bois a par le passé été abandonné au profit de matériaux (plastique, acier, ...) créés par l'homme et dont les propriétés sont maîtrisées et bien connues. A l'heure des crises écologiques et des pénuries de matériaux fossiles, les consciences cherchent à retourner vers le matériau bois. Naturel, et présent en grande quantité, le bois possède des performances techniques compatibles avec ces usages et la faible énergie requise pour sa mise en forme ou son usinage représente de plus un atout. Plusieurs démarches tendent donc d'inverser cette tendance et de développer l'usage du bois.

Le bois et spécifiquement les panneaux à base de bois type contreplaqué, possède une variabilité intrinsèque due à son origine naturelle. Dans un contexte où l'industrie est de plus en plus automatisée pour éviter sa délocalisation, des variations de formes (dues au procédé ou à la présence de singularités dans le matériau) peuvent entraver le fonctionnement des process (difficulté de préhension par un robot par exemple).

L'utilisation de placages issus du déroulage constitue une excellente piste pour limiter les émissions de CO₂ des industries du transport et de la construction de par la souplesse de conception qu'elle offre et l'optimisation possible des propriétés des produits reconstitués. Le développement des produits à base de placages de bois vers des usages de masse dans les filières nécessite cependant une approche permettant d'intégrer les spécificités inhérentes à ce matériau pour être compétitif vis-à-vis de produits issus de la pétrochimie ou de composites fibreux à renfort de fibre de carbone par exemple.

Objectifs

L'objectif de ce projet est d'étudier le procédé du déroulage afin de maîtriser et de contrôler les déformations lors de variations hydriques de placages et contreplaqués. Ce procédé consiste à « dérouler » une bille de bois pour en faire un ruban continu de faible épaisseur qui est alors massicoté aux dimensions voulues, on parle de placages. Ces placages sont ensuite séchés et peuvent être utilisés dans la fabrication de panneaux de contreplaqués après encollage puis pressage des placages.

De par l'aspect naturel et variable du bois, sa transformation par déroulage engendre des défauts divers (présence de fentes, fissuration cyclique, variation d'épaisseur...). En amont de l'étape de collage indispensable à la fabrication de tout type de produit multiplis à base de placages, il est nécessaire de passer par une étape de séchage de ces derniers. Ce séchage fait parfois apparaître des ondulations sur les placages dues à des différences de retraits (variations dimensionnelles lorsque le taux d'humidité évolue) entre deux zones adjacentes.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension et de modéliser les phénomènes de déformations des produits à deux échelles :

- A l'échelle du placage, afin d'améliorer la productivité et de faciliter l'automatisation des unités de production de panneaux à base de placages,
- A l'échelle du panneau, pour limiter les rebuts dus à des déformations excessives et/ou faciliter l'automatisation des unités de troisième transformation consommatrices de panneaux à base de placages.

Matériel

La plateforme technologique WoMaM du LaBoMaP est équipée d'une ligne complète de déroulage industrielle comme illustré dans la Fig. 1 (emballage léger) permettant de dérouler des billons (tronçon d'un tronc d'arbre). Des capteurs sont agencés sur l'intégralité de cette dérouleuse afin d'acquérir les paramètres nécessaires à la compréhension du phénomène (mesure locale de l'orientation des fibres, un système de mesure de la fissuration et un système de mesure de l'ondulation des placages secs (SWAN) fonctionnant sur le principe de la triangulation laser, Fig. 2).

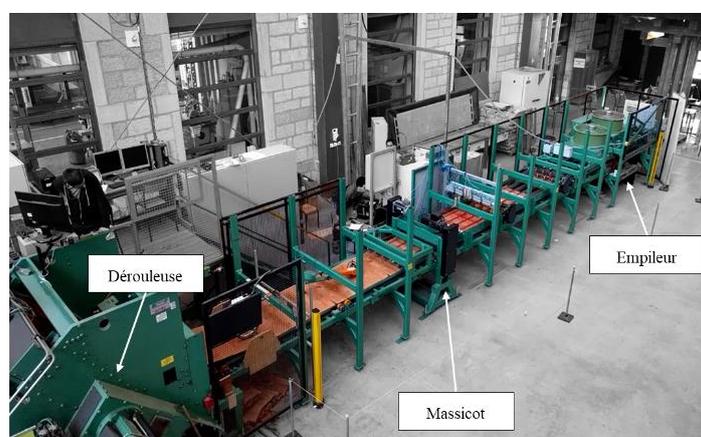


Fig. 1 : Dérouleuse industrielle et instrumentée du laboratoire

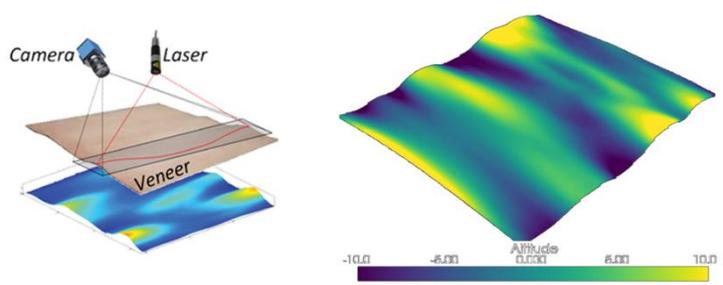


Fig. 2 : Appareil de mesure des ondulations de placages (System Of Wayviness Analysis)

Travail prévu

Premier axe : Modélisation des ondulations des placages

Le premier axe du projet portera sur la compréhension et la modélisation des ondulations de placages lors de leur séchage. La littérature scientifique sur le sujet, et particulièrement les travaux de Gornik Bučar et Gospodarič (2016) P. Pulkkinen et al. (2000), est assez ancienne et porte principalement sur l'influence des paramètres du procédé ou des défauts du bois sur les ondulations de placages. À notre connaissance, il n'existe pas d'étude tirant parti de la mesure fine de singularités locales pour modéliser les ondulations à l'échelle d'un placage, probablement, car cette mesure n'a été que peu réalisée dans la littérature scientifique sur des placages faute de disposer de scanners adaptés.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, la démarche proposée consiste en la mesure des propriétés du matériaux à l'échelle locale sur les placages influençant le retrait du bois. Ces mesures seront intégrées dans des modélisations (statistiques ou éléments finis) pour prédire leur éventuelle ondulation après séchage et les défauts de forme des produits multiplis reconstitués à partir de ces placages.

Deuxième axe : Modélisation des déformations de panneaux

Plusieurs travaux scientifiques ont traité des déformations des panneaux multiplis constitués de placages déroulés. En particulier, des études complètes et structurées des causes de déformation des placages plats ou moulés, comme les travaux de Blomqvist (2015) et ceux de Blomqvist et al. (2014), ont permis de mettre en évidence différents facteurs responsables de l'apparition de déformations des panneaux :

- La composition des panneaux multiplis : le fait par exemple de ne pas respecter une structuration symétrique des panneaux par rapport à la direction des fibres est extrêmement défavorable,
- Les hétérogénéités d'humidité des plis : un soin tout particulier doit être apporté pour limiter leur hétérogénéité ou rendre symétrique la répartition des plis dont l'humidité est comparable. Cette étape impose un séchage et des conditions de stockage des placages maîtrisés,
- La nature des adhésifs employés et leurs protocoles d'application pour la constitution des panneaux ou encore les paramètres de pressage (en particulier de pression et de température) employés pour faire réticuler la colle.

Ces différents paramètres viendront s'ajouter aux types de singularités mesurées sur les placages constitutifs des panneaux. La démarche scientifique consistera donc en la réalisation de multiplis (plats ou moulés) à partir de placages caractérisés à l'aide des mêmes mesures de singularités mentionnées dans l'Axe 1 tout en contrôlant les paramètres du procédé de constitution du multiplis. Les propriétés locales seront alors, de manière analogue aux travaux proposés dans l'Axe 1, intégrées dans des modèles mécaniques numériques afin de prédire les déformations des multiplis. Les résultats de ces modélisations seront comparés à la réalité expérimentale des déformations (subies ou provoquées pour en faciliter l'étude) des panneaux multiplis.

Remerciements

Cette étude est financée par la région Bourgogne Franche-Comté

Références

Gornik Bučar D, Gospodarič B (2016) Waviness of beech sliced veneer, *Acta Silvae Ligni*, no 110, p. 15-26.

Pulkkinen P, Hanhijarvi A, Rohumaa A, Sundman S, Hyttinen P, Sokka K, Paajanen T (2000) Veneer drying. Viilun kuivaus. Puumateriaalin ja kuivausprosessin vaikutukset tuoteominaisuuksiin (Effects of wood raw material and drying process on product properties). Finland.

Blomqvist L (2015) Shape stability of laminated veneer products—a review—defining and achieving shape stability, *Int. Wood Prod. J.*, vol. 6, no 2, p. 89-95.

Blomqvist L, Sandberg D, Johansson J (2014) Influence of veneer orientation on shape stability of plane laminated veneer products, *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 9, no 4, p. 224-232.

WoodSun : un projet collaboratif de science ouverte du GDR 3544 Sciences du Bois : la structure du bois agrandie en 3D.

BADEL Eric¹, ARNOULD Olivier^{2,3}, BOZONNET Cyril¹, CONCHON Pierre¹, DUHAMEL Yvan³, RUELLE Julien⁴, VIGUIER Joffrey⁵

¹ Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, 63000 Clermont–Ferrand, France

² LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

³ Pro3D, Université de Montpellier, Montpellier, France

⁴ Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France

⁵ Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, 71250 Cluny, France

eric.badel@inrae.fr

Mots clef: bois, anatomie, microtomographie à rayons X, fabrication additive, science ouverte

Contexte et objectifs

Le bois est un matériau cellulaire complexe par son hétérogénéité et sa variabilité. Le premier niveau de variabilité est celui de l'espèce, laquelle pilote l'organisation du plan ligneux, qui lui est spécifique. Mais au sein d'une même espèce, avec le même bagage génétique, chaque arbre a son propre mode de croissance, de formation du bois, lesquels sont alors fortement dépendants de la région, de la placette, dans laquelle il se développe mais aussi de l'environnement local de l'individu. Enfin, chaque année, chaque saison impose ses conditions environnementales de croissance qui vont moduler les processus biologiques. A cela se rajoutent les spécificités locales du bois liées à des développements particuliers tels que les nœuds, la présence de bois de réaction, etc.

Mais, finalement, même parmi ceux qui travaillent le bois quotidiennement, peu nombreux sont ceux qui ont l'occasion d'observer du bois sous microscope pour en apprécier toute sa complexité et la diversité de ses structures. Et pourtant les enseignants, en lycée, à l'université, dans une école d'ingénieur de sciences du bois, qui souhaitent montrer ces structures fascinantes à leurs élèves sont nombreux.

Il existe maintenant une solution théoriquement simple, un peu plus complexe à mettre en œuvre, qui permet de mettre dans les mains de tous, un objet, copie conforme d'une structure anatomique de bois en 3D.

Matériels et méthodes

La première étape consiste à réaliser un scan d'un échantillon de bois grâce à une technologie de microtomographie à rayon X. Complètement non invasive, cette technique s'est imposée pour observer la structure interne d'échantillons sans aucune préparation ni découpe (Badel et al. 2008, Charra-Vaskou et al. 2012, Dalla-Salda et al. 2014). La microtomographie à rayons X consiste à réaliser de nombreuses radiographies 2D, ou « projections », d'un échantillon fixé sur une platine de rotation. Ces projections représentent des cartographies d'absorption de l'échantillon, intégrées sous différents angles. L'ensemble de ces projections est alors passé dans un algorithme, la « reconstruction », qui permet d'obtenir la cartographie 3D complète de la pièce de bois. Le résultat est un fichier image 3D.

Pour réaliser cette opération, nous avons passé une convention avec le Synchrotron SOLEIL (Paris-Saclay) qui a donné accès pendant 48 heures à la ligne de lumière PSICHE à une équipe de 6 personnes du GDR Sciences du Bois.

En termes d'échantillonnage, nous avons fait appel à différentes xylothèques françaises, en particulier celle d'AgroParisTech à Nancy et celle du CIRAD à Montpellier, spécialisée dans les essences tropicales. De nombreux échantillons, venant des laboratoires participants ont complété cet échantillonnage qui regroupait plus de 100 essences tempérées et tropicales (Fig. 1a).

Les échantillons ont été préparés sur place, principalement par fendage afin de garantir une découpe selon le fil du bois. Les dimensions caractéristiques étaient alors de l'ordre de $2 \times 2 \times 15 \text{ mm}^3$ dans les directions radiale, tangentielle et longitudinale, respectivement (Figs. 1b et 2a).

Chaque échantillon a ensuite été placé sur la platine de rotation du microtomographe de la ligne PSICHE (Fig. 2b). Un scan dure environ 10 minutes pour 1000 projections réalisées avec un faisceau monochromatique de 17 keV.

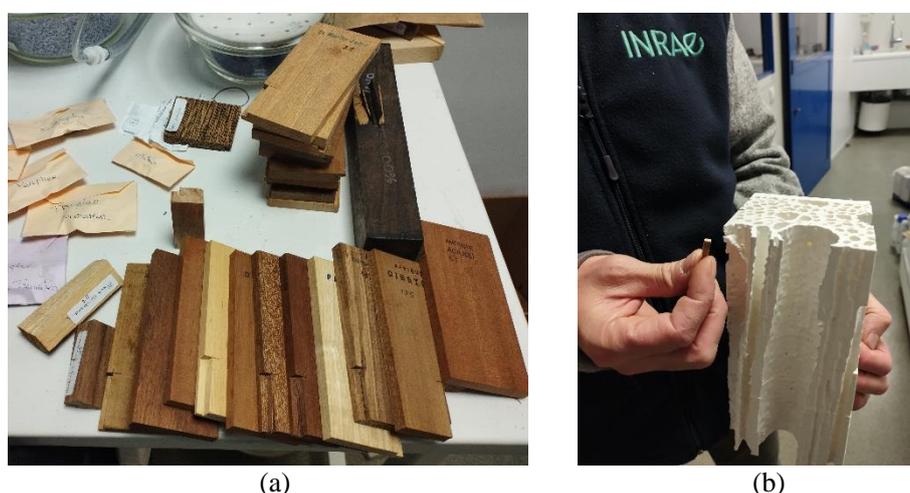


Fig. 1 : a) Plaquettes de bois issues des xylothèques d'AgroParisTech (Nancy) et du Cirad (Montpellier).
b) Un échantillon de bois et son homologue reproduit par impression 3D avec un grossissement $\times 1000$.

La seconde étape est celle du traitement d'image qui va permettre de nettoyer et segmenter afin de distinguer la matière (les parois cellulaires) et l'air contenu dans les lumens (Fig. 2c). Un protocole a été mis en place avec une version gratuite du logiciel DragonFly (<https://www.theobjects.com/dragonfly/index.html>).

La troisième étape utilise un logiciel spécifique qui permet de transformer l'image volumique ainsi traitée en une information vectorisée compatible avec une imprimante 3D.

La dernière étape consiste en l'impression 3D de l'objet, à la dimension désirée par l'utilisateur (Fig. 1b).

Résultats

Plus de 160 scans ont ainsi été réalisés avec une résolution de $1,3 \mu\text{m}$. Une cinquantaine de scans ont été réalisés avec une résolution spatiale de $0,6 \mu\text{m}$ afin de cibler de petits éléments anatomiques tels que des ponctuations. L'opération a duré 48h de scans ininterrompus (Fig. 2b et 3).

L'ensemble des scans bruts, constituant une base de 10 To de fichiers, est stocké sur le serveur du synchrotron SOLEIL et sur disque dur. Les fichiers images sont traités à l'UMR PIAF à Clermont Ferrand et convertis en fichiers STL qui sont retraités par la plateforme Pro3D de l'Université de Montpellier (<https://centre-pro3d.fr/>).

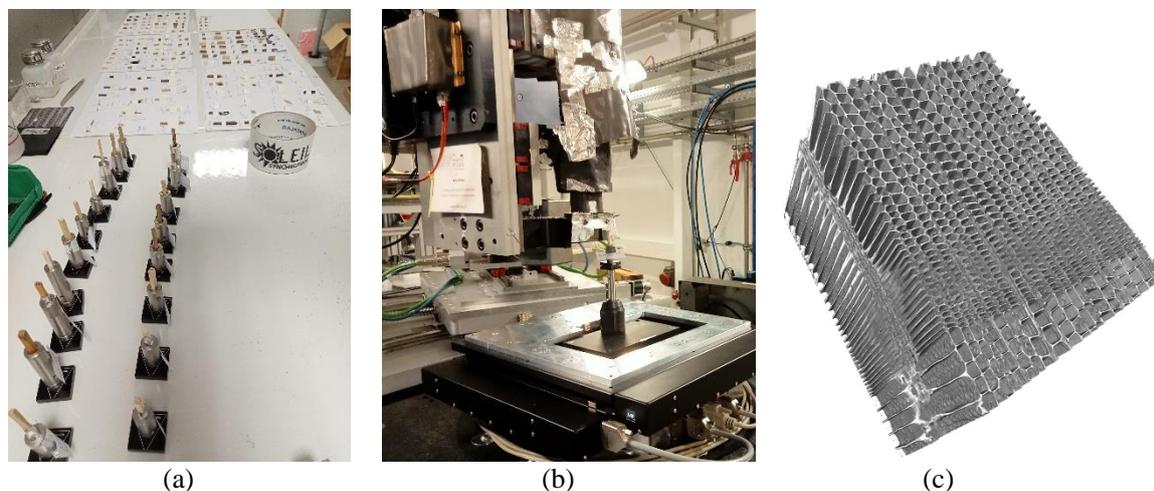


Fig. 2: a) Préparation des échantillons pour les scans tomographiques sur les supports. b) L'échantillon est ensuite fixé sur la platine de rotation située devant le détecteur 2D. c) Visualisation 3D après segmentation.

Dans un esprit de Sciences Ouverte, les fichiers sont ainsi mis à disposition, au fur et à mesure qu'ils sont traités, sur le serveur du GDR Sciences du Bois : <https://www6.inrae.fr/gdr-sciences-du-bois>. Des discussions sont aussi en cours pour un dépôt sur un entrepôt de données institutionnel (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/>)



Fig. 3: L'équipe du GDR Sciences du bois dans la cabine de microtomographie de la ligne PSICHE du Synchrotron SOLEIL.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des collaborateurs qui nous ont permis d'accéder à leurs collections d'échantillons de bois ; en particulier David Gasparotto (AgroParisTech) pour l'accès à la xylothèque de Nancy, Loïc Brancheriau et Patrick Langbour (CIRAD) pour l'accès à la xylothèque du CIRAD de Montpellier. Les auteurs remercient aussi la direction et les services de communication du Synchrotron SOLEIL pour l'accès offert à la ligne PSICHE ainsi qu'Andy King de la ligne PSICHE pour son soutien technique.

References

- Badel E., Lux, J., Delisée C. (2008) 3D structural characterisation, deformation measurements and assessment of low-density wood fibreboard under compression. The use of X-ray microtomography. *Composite Sciences and Technology*, 68 (7-8): 1654-1663. [hal-00964861v1](#)
- Charra-Vaskou K., Badel E., Burlett R., Cochard H., Delzon D., Mayr S. (2012) Hydraulic efficiency and safety of vascular and non-vascular components in *Pinus pinaster* leaves. *Tree Physiology*, 32 (9): 1161-1170. [hal-00964504v1](#)
- Dalla-Salda G., Fernández M.E., Sergent A.S., Rozenberg P., Badel E., Martinez-Meier A. (2014) Dynamics of cavitation in a Douglas-fir tree-ring: transition-wood, the lord of the ring? *Journal of Plant Hydraulics*, 1: e-0005 [hal-01095363v1](#)
- Dragonfly 2022.2 (Computer software). Comet Technologies Canada Inc., Montreal, Canada; software available at <https://www.theobjects.com/dragonfly>.

Caractérisation par tomographie ultrasonore du chêne vert employé dans la charpente de la Cathédrale Notre Dame de Paris

DUBOIS Frédéric¹, AFOUTOU Jérôme¹, ZHANG Xi¹

¹ Univ. Limoges, GC2D, UR 14477, F-87000 Limoges, France
frederic.dubois@unilim.fr

Mots clefs : Chêne vert, Propriétés d'élasticité, tomographie ultrasonore, méthodes inverses

Contexte et objectifs

L'incendie du 15 avril 2019, qui a ravagé la Cathédrale Notre Dame de Paris, a ému l'ensemble de notre communauté. En revanche, le projet de réhabilitation et le soutien scientifique apporté aux bureaux d'études Bois-Construction, ont permis de mettre en exergue de nouveaux verrous scientifique au niveau, dans le cas de la charpente, de l'emploi de chêne vert. Dans ce contexte, de nombreuses campagnes de caractérisation, que ce soient au niveau du matériau même mais également au niveau des nœuds d'assemblage. Une campagne expérimentale a été menée, fin 2022, pour aboutir à la définition d'une classe de résistance mécanique définie à l'aide de la connaissance de la contrainte de rupture en flexion, le module d'élasticité longitudinal et la masse volumique afin de permettre, à termes, aux bureaux d'étude de justifier leurs notes de calcul tant aux états limites ultime et de service. Au-delà de la définition des valeurs caractéristiques, une technique de tomographie ultrasonore innovante a permis de compléter les données expérimentales en recalculant le tenseur de rigidité complet du matériau bois étudié.

Essais de caractérisation

Les essais de caractérisation reposent sur 17 poutres de 8m de longueur avec des sections transversales hétérogènes. Dans le cadre de ce travail, nous retiendrons que les résultats d'une de ces poutres. Ces essais emploient le protocole de flexion 4 points avec un calcul du module d'élasticité longitudinal employant la flèche circulaire selon la norme EN 408, Fig. 1.

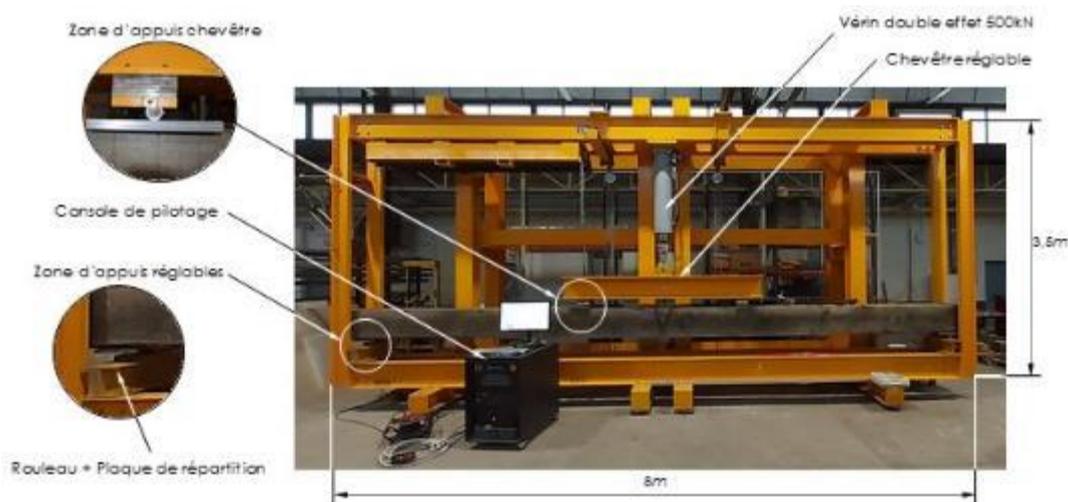


Fig. 1 : Dispositif flexion 4 points

Les trois grandeurs retenues, à savoir la masse volumique, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte à la rupture en flexion sont reportées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Valeurs moyennes caractéristiques déterminées sur le lot

| Masse volumique (ρ) | Module d'élasticité longitudinal (E_0) | Contrainte de flexion axiale (f_m) |
|----------------------------|--|--|
| 907 kg/m ³ | 13.7 GPa | 56.2 MPa |

Cartographie hydrique des sections transversales

La suite de l'étude se concentre donc sur une poutre du lot testé précédemment. L'objectif, de cette section étant de caractériser l'état hydrique de la poutre. Nous supposons une homogénéité du gradient hydrique en section courante en distinguant les sections d'about qui ont subi un séchage longitudinal. Deux sections transversales, respectivement sections d'about et courante, sont indiquées en Fig. 2. Elles représentent deux plateaux de 4cm d'épaisseur.

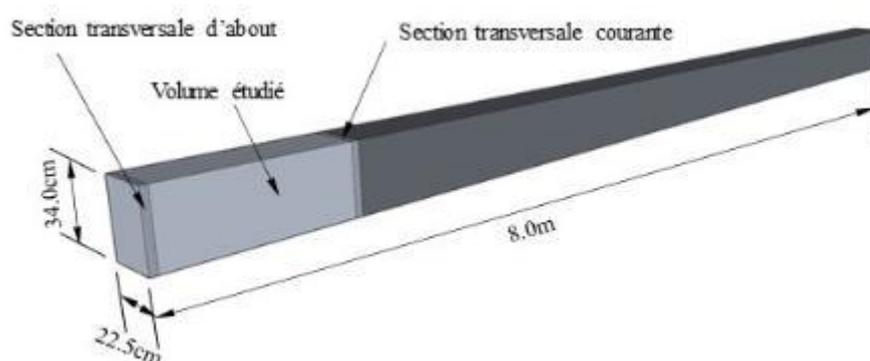


Fig. 2 : Préparation des échantillons

Les deux plateaux sont découpés, six mois après la réception du lot, afin d'obtenir des cubes de 4cm de côté. Par méthode de double pesée, les échantillons sont placés, pendant un mois et demi, dans une étuve à 103°C afin de tendre vers un état anhydre, Fig. 3.

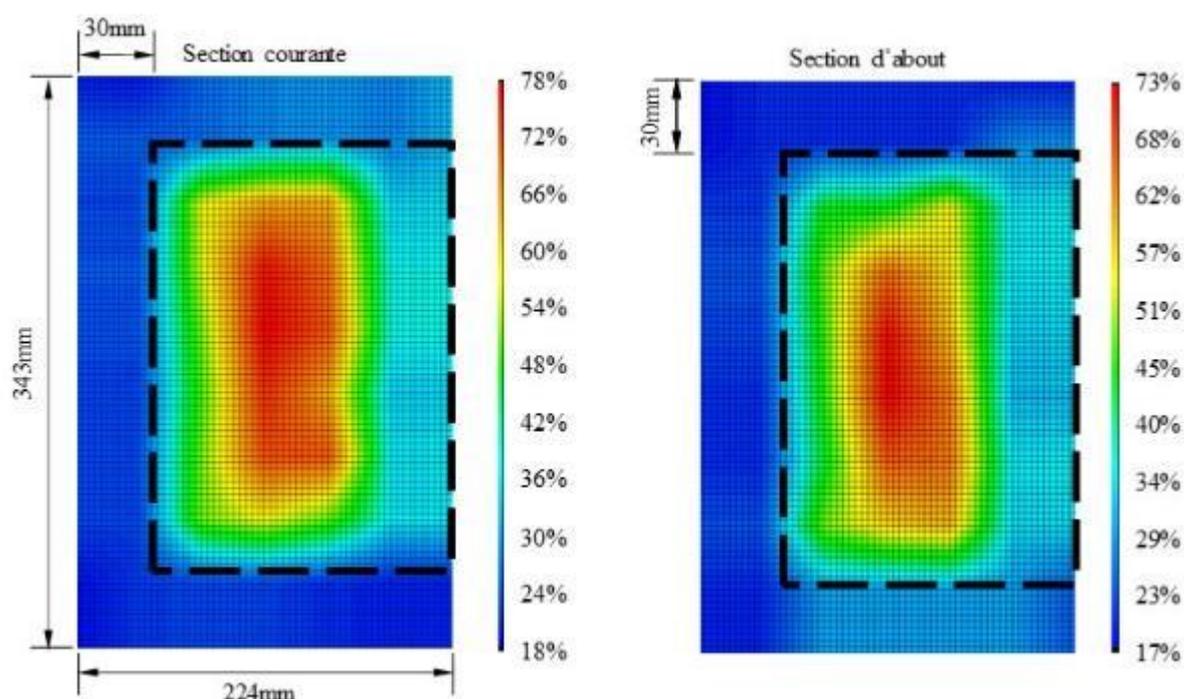


Fig. 3 : Cartographies hydriques

A une température de conservation de 20°C, les travaux de M. Varnier (2019) permettent d'estimer une humidité interne de saturation des fibres de 31 % (Point de Saturation des Fibres à 20°C). Les cartographies hydriques permettent de déterminer l'état hydrique des deux sections

considérées en précisant la zone périphérique (± 3 cm non centrée du fait du conditionnement de la poutre à plat) dans laquelle l'humidité interne place le matériau dans son domaine hygroscopique. Cela correspond à une proportion de bois 'vert' de 80% pour laquelle nous supposons une homogénéité des propriétés d'élasticité. La section d'about a cependant subi un séchage accéléré par un transfert hydrique longitudinal avec, au moment des mesures, une humidité moyenne de 40% avec une amplitude surfacique allant de 17% en périphérie et 78% à cœur. En revanche, concernant la section courante, nous mesurons une humidité moyenne de 46% avec une amplitude surfacique de 18% à 78%. En moyenne, cela correspond, en négligeant les variations dimensionnelles lors du séchage, à une masse volumique anhydre moyenne de 550 kg/m^3 .

Tomographie ultrasonore

L'utilisation des méthodes ultrasonores sont employées depuis plusieurs décennies pour caractériser le module d'élasticité longitudinal des éléments en bois qu'il soit sur pied ou sous forme d'éléments structuraux. Dans ce travail, la méthode a été développée dans le but de caractériser l'ensemble des propriétés d'élasticité, c'est-à-dire, la globalité du tenseur de rigidité ou de complaisance. Le verrou majeur de ce travail est de prendre en compte l'orthotropie du matériau, d'une part, et l'orthotropie cylindrique, d'autre part, dans le plan RT induite par les cernes de croissances. Afin de relever ce défi, deux étapes cruciales ont été franchies. La première a consisté à déterminer le champ de vitesse de propagation des ondes en prenant en compte le caractère orthotrope du milieu. La seconde concerne la projection des propriétés d'élasticité dans les trois plans de symétrie, à savoir, les plans RT, RL et TL, le tout piloté par des algorithmes d'optimisation numérique par éléments finis.

Vitesses de propagation d'ondes dans un milieu orthotrope

Afin de déterminer les propriétés ultrasonores focalisées sur les champs de vitesse répondant aux propriétés d'orthotropie, il a été employé une nouvelle formulation d'Hankinson appliquée à un milieu tridimensionnel. Considérons les positions données d'un transmetteur et d'un récepteur ultrasonores. Dans le cas d'un repère d'orthotropie cartésien, la ligne de propagation d'onde, que nous supposons linéaire, est caractérisée par son vecteur directeur \vec{v} repéré par les angles α et θ , et ce, dans une représentation sphérique, Fig. 4.

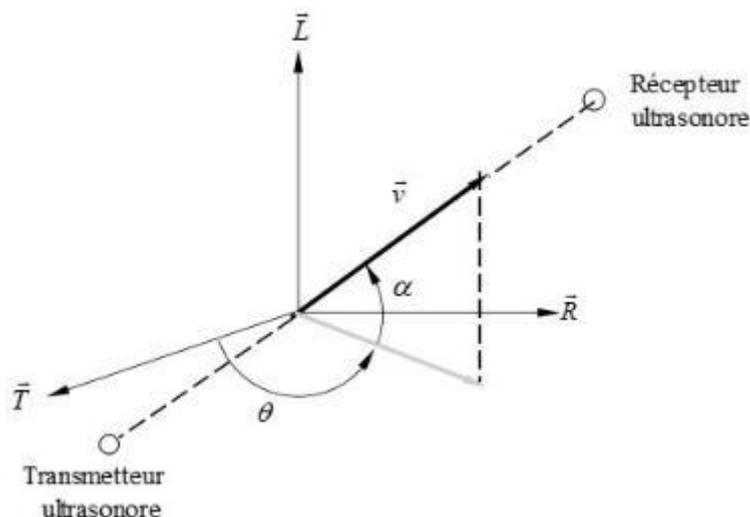


Fig. 4 : Vecteur directeur de la ligne de propagation d'onde

La formulation d'Hankinson 3D (Afoutou et al., 2023) permet de définir toute vitesse de propagation en fonction des trois vitesses principales (V_L ($\alpha = \frac{\pi}{2}$), V_R ($\alpha = 0$, $\theta = \frac{\pi}{2}$), V_T ($\alpha = 0$, $\theta = 0$)) et de trois paramètres d'optimisation (l , m , n). Pour deux angles quelconques (α et θ), la vitesse $V(\alpha, \theta)$ est donnée par l'expression suivante :

$$V(\alpha, \theta) = \frac{V_L \cdot V_R \cdot V_T}{V_R \cdot \cos^l(\theta) \cdot [V_L \cdot \cos^m(\alpha) + V_T \cdot \sin^m(\alpha)] + V_T \cdot \sin^l(\theta) \cdot [V_L \cdot \cos^n(\alpha) + V_R \cdot \sin^n(\alpha)]} \quad (1)$$

La détermination des paramètres d'Hankinson nécessite, selon l'expression (1), d'avoir une forte ouverture angulaire, ce qui implique une tomographie ultrasonore qui se traduit par différentes combinaisons de tirs directs, indirects et semi-directs, Fig. 5.

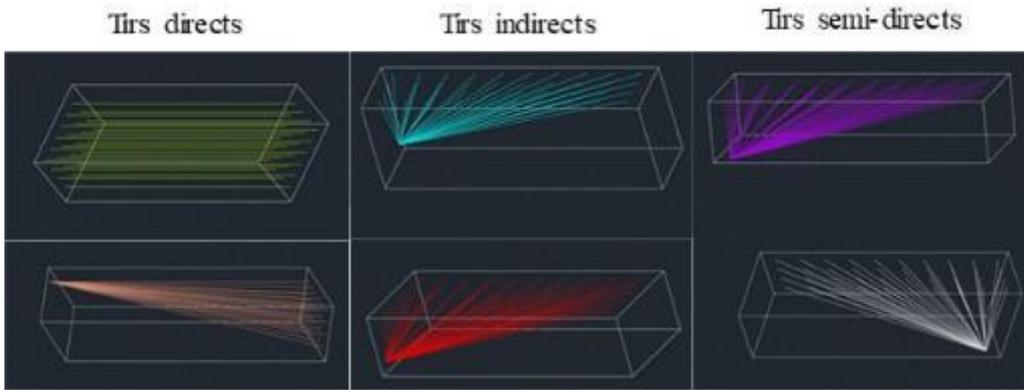


Fig. 5 : Configurations de tirs ultrasonores

Sous les hypothèses d'un milieu homogène, un algorithme de type Simplex est employé afin de déterminer les paramètres d'Hankinson listés dans le Tab. 2. Afin de prendre en compte l'orthotropie cylindrique, l'algorithme d'optimisation et le calcul des vitesses analytique ont été implémenté dans le code aux éléments finis Castem.

Tab. 2 : Paramètres d'Hankinson 3D

| V_L | V_T | V_R | l | m | n |
|---------|---------|---------|------|------|------|
| 4270m/s | 1490m/s | 1600m/s | 1.64 | 1.72 | 1.36 |

A présent, il reste à effectuer le lien entre les vitesses de propagation d'ondes ultrasonores et les propriétés d'élasticité du matériau. Pour cela, nous reprenons la démarche proposée par Zhang et al. (2022). Dans un plan d'orthotropie XY, la vitesse de propagation d'ondes de compression $V_{xy}(\alpha_{xy})$:

$$V_{xy}(\alpha_{xy}) = \sqrt{\frac{C_{x'x'}(\alpha_{xy})}{\rho}} \quad (2)$$

α_{xy} l'angle entre le vecteur directeur de propagation d'onde et l'axe \bar{x} . Dans le plan XY, les vitesses de propagation d'ondes répondent au modèle d'Hankinson standard, à savoir :

$$V_{xy} = \frac{V_x \cdot V_y}{V_x \cdot (\sin \alpha_{xy})^{n_{xy}} + V_y \cdot (\cos \alpha_{xy})^{n_{xy}}} \quad (3)$$

Zhang a défini le lien entre la complaisance apparente $C_{x'x'}$ et les propriétés d'élasticité dans le plan XY :

$$C_{x'x'} = \frac{E_{x'} \cdot E_{y'} \cdot (E_{z'} - E_{y'} \cdot \nu_{z'y'}^2)}{E_{y'} \cdot E_{z'} - E_{x'} \cdot E_{z'} \cdot \nu_{y'x'}^2 - E_{x'} \cdot E_{y'} \cdot \nu_{z'x'}^2 - E_{y'}^2 \nu_{z'y'}^2 - 2 \cdot E_{x'} \cdot E_{y'} \cdot \nu_{y'x'} \cdot \nu_{z'y'} \cdot \nu_{z'x'}} \quad (4)$$

Par application d'un opérateur vectoriel de rotation, chaque propriété d'élasticité, définie dans ce repère, s'expriment en fonction des propriétés d'élasticité définies dans le repère principal d'orthotropie définissant le plan XY :

$$E'_x = \left(\frac{\cos^4(\alpha_{xy})}{E_x} + \frac{\sin^4(\alpha_{xy})}{E_y} + \frac{\sin^2(\alpha_{xy}) \cdot \cos^2(\alpha_{xy})}{G_{xy}} - 2 \cdot \frac{\sin^2(\alpha_{xy}) \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \nu_{yx}}{E_y} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$E'_y = \left(\frac{\sin^4(\alpha_{xy})}{E_x} + \frac{\cos^4(\alpha_{xy})}{E_y} + \frac{\sin^2(\alpha_{xy}) \cdot \cos^2(\alpha_{xy})}{G_{xy}} - 2 \cdot \frac{\sin^2(\alpha_{xy}) \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \nu_{yx}}{E_y} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$E'_z = E_z \text{ (hors plan)} \quad (7)$$

$$\nu'_{xy} = \frac{\frac{\nu_{yx}}{E_y} - \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy}) \cdot \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2 \cdot \nu_{yx}}{E_y} - \frac{1}{G_{xy}} \right)}{\frac{\cos^4(\alpha_{xy})}{E_x} + \frac{\sin^4(\alpha_{xy})}{E_y} + \frac{\cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{yx} \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{E_y}} \quad (8)$$

$$\nu'_{xz} = \frac{\frac{\nu_{zx}}{E_z} \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) + \frac{\nu_{zy}}{E_z} \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{\frac{\cos^4(\alpha_{xy})}{E_x} + \frac{\sin^4(\alpha_{xy})}{E_y} + \frac{\cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{yx} \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{E_y}} \quad (9)$$

$$\nu'_{yz} = \frac{\frac{\nu_{zx}}{E_z} \cdot \sin^2(\alpha_{xy}) + \frac{\nu_{zy}}{E_z} \cdot \cos^2(\alpha_{xy})}{\frac{\sin^4(\alpha_{xy})}{E_x} + \frac{\cos^4(\alpha_{xy})}{E_y} + \frac{\cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{G_{xy}} - \frac{2 \cdot \nu_{yx} \cdot \cos^2(\alpha_{xy}) \cdot \sin^2(\alpha_{xy})}{E_y}} \quad (10)$$

Les expressions (5) à (10) se multiplient selon le plan d'orthotropie considéré, et ce, par permutation circulaire en respectant les notations du Tab. 3.

Tab. 3 : Définition paramétrique des plans d'orthotropie

| Plan XY | V_x | V_y | α_{xy} | n_{xy} |
|---------|-------|-------|--|----------|
| Plan LR | V_L | V_R | $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \theta = \frac{\pi}{2}$ | n |
| Plan TL | V_T | V_L | $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \theta = 0$ | m |
| Plan RT | V_R | V_T | $\alpha = 0, \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right]$ | l |

En combinant les équations (5 à 10) dans les expressions (2) et (3), un algorithme d'optimisation est employé pour déterminer l'ensemble des paramètres d'élasticité afin de minimiser les écarts entre les vitesses exprimées par l'équation (3) et les vitesses angulaires déterminées par les fonctions d'Hankinson (3), et ce, pour les trois plans d'orthotropie considérés. Les résultats d'optimisation sont présentés dans le Tab. 4.

Tab. 4 : Propriétés d'élasticité après optimisation

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| E_L | E_R | E_T | G_{LR} | G_{LT} | G_{RT} |
| 13.8GPa | 2.05GPa | 1.72GPa | 0.84 | 1.49 | 0.42 |
| ν_{RL} | ν_{TR} | ν_{TL} | ν_{LR} | ν_{RT} | ν_{RT} |
| 0.057 | 0.131 | 0.041 | 0.381 | 0.156 | 0.33 |

Conclusion et perspectives

Les résultats mettent en exergue leur cohérence avec la caractérisation en flexion circulaire du module d'élasticité de la poutre testée même si, dans la réalité, l'hypothèse d'homogénéité des propriétés n'est pas respectée en périphérie où le chêne se retrouve dans son domaine hygroscopique. Néanmoins, la proportion de bois vert permet de préciser que les vitesses de propagation d'ondes le long des différents chemins de propagation restent quasi homogènes dès que nous considérons des tirs directs, indirects et semi-directs, et ce, sur des chemins de propagation suffisamment longs. Ce travail, appliqué pour la qualification mécanique du chêne vert pour la reconstruction de la charpente de Notre Dame de Paris a également vocation d'être employé dans des travaux d'inspection et de diagnostic de pièces de bois de structures dans le cadre de travaux de maintenance, de renforcement ou de requalification. Dans ce contexte, ce travail doit être complété par la prise en compte de gradients d'humidité pour des éléments en service, et ce, dans le domaine hygroscopique.

Références

- Afoutou J., Dubois F., Sauvat N., Takarli M. (2023) A novel three-dimensional model for the prediction of ultrasonic velocity in wood considering its orthotropy, *Wood Science and Technology*, 57(3):605-623.
- Zhang X., Dubois F., Sauvat N., Takarli M. (2022) Hybrid numerical model for the ultrasonic wave propagation velocity in orthotropic materials, *Wood Science and Technology*, 56(6):1605-1630.
- Varnier M. (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus, Thèse de doctorat, Université de Limoges.

Evaluation de la durabilité de panneaux isolants à base de fibres de bois sous conditions tropicales par techniques de mesure de champs

MAHAMAT SALEH Atteib¹, DUPRE Jean-Christophe¹, BOSSU Julie², DOUMALIN Pascal¹

¹Equipe PEM, Institut PPRIME, UPR 3346, Université de Poitiers-CNRS

² UMR EcoFoG, INRA, CNRS, Cirad, AgroParisTech, Univ. Antilles, Univ. Guyane
atteib.mahamat.saleh.cheikhadine@univ-poitiers.fr

Mots clefs : Panneaux isolants ; fibres ; mesure optique ; tomographie rayons X ; comportement hygromécanique ; durabilité

Contexte et objectifs

Ce travail s'inscrit dans le projet de recherche ANR *PANTHER²Guyane* (*PAN*neaux *THER*miques issus de la valorisation des Ressources bois Résiduelles en *Guyane*). L'objectif est d'étudier le potentiel d'une chaîne de production de bio-isolants adaptés aux conditions hygrothermiques extrêmes de la Guyane, à partir de la valorisation des ressources bois résiduelles locales (connexes industriels, résidus de défriches, etc.). Techniquement, le projet repose sur l'hypothèse que les propriétés naturelles exceptionnelles des fibres des bois tropicaux peuvent permettre la mise en forme de produits hautement performants pour la construction durable en zone tropicale. En adaptant une technique basée sur le feutrage des fibres, les recherches s'orientent vers la conception et la production de panneaux isolants semi-rigides non tissés, épais et légers, peu coûteux et avec de bonnes propriétés thermique, mécanique, ainsi que de bons comportements vis-à-vis du feu et des attaques biologiques

Dans ce contexte, le travail présenté, débuté en octobre 2023 (thèse d'Atteib MAHAMAT SALEH), se focalise sur l'évaluation du comportement hygromécanique des panneaux isolants soumis aux conditions tropicales spécifiques à la région guyanaise (humidité et température élevées). 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 modification de la distribution des pores dans le matériau et la perte de performance d'isolation. Les panneaux seront étudiés dans différentes situations (Fig. 1) :

- (i) Sur des portions de panneaux en laboratoire, à différents taux d'humidité pour établir le lien entre hygrométrie et réponse mécanique,
- (ii) A l'échelle d'un arrangement de fibres sur des échantillons centimétriques pour analyser l'effet de l'hygrométrie sur la microstructure.
- (iii) A l'échelle d'un panneau en conditions réelles en Guyane, au laboratoire EcoFoG, dans des répliques d'habitation pour des panneaux de toits et de murs.

Matériel et méthode

Les panneaux sont réalisés par l'I2M (Bossu 2023) à partir de fibres de bois issues de la collecte de déchets, de résidus de travaux forestiers et de sciage. Après broyage grossier et fractionnement pour atteindre une granulométrie cible (Fibre Recherche Développement), les fibres sont mélangées à des fibres synthétiques (polyester, polypropylène, 5% en masse) pour former des nappes sur le principe du feutrage qui sont finalement consolidées thermiquement en four. Différentes essences de bois seront analysées aux différentes échelles et pour des cycles d'humidité couplée ou non à des chargements mécaniques.

Pour ce type de matériaux, les techniques de mesure optiques sans contact sont toutes indiquées (Tran 2013) comme la corrélation d'images et le suivi de marqueurs. Elles sont employées dans différentes situations : en 2D pour une mesure en surface d'un phénomène plan, en 2D ½ (stéréovision) pour prendre en compte les mouvements hors plan et en 3D, pour une analyse dans le volume avec des acquisitions par microtomographie RX (Tran 2013).

La première partie de l'étude consiste à développer les bancs d'expérimentation dans les trois configurations décrites précédemment. Le premier est constitué d'une enceinte climatique avec une porte vitrée permettant d'enregistrer les images de l'échantillon et d'un système de chargement. Le second banc est une micromachine de compression implantable dans un microtomographe RX sous conditions d'hygrométrie et de chargement mécanique contrôlé. Le dernier dispositif est un banc de stéréovision implantable dans des répliques d'habitation et résistant aux conditions tropicales. Avant de tester les panneaux de fibres produits dans le projet sur les systèmes réalisés, des pré-tests en laboratoire sur des panneaux isolants commerciaux seront menés afin de valider les dispositifs et déterminer leurs performances métrologiques.

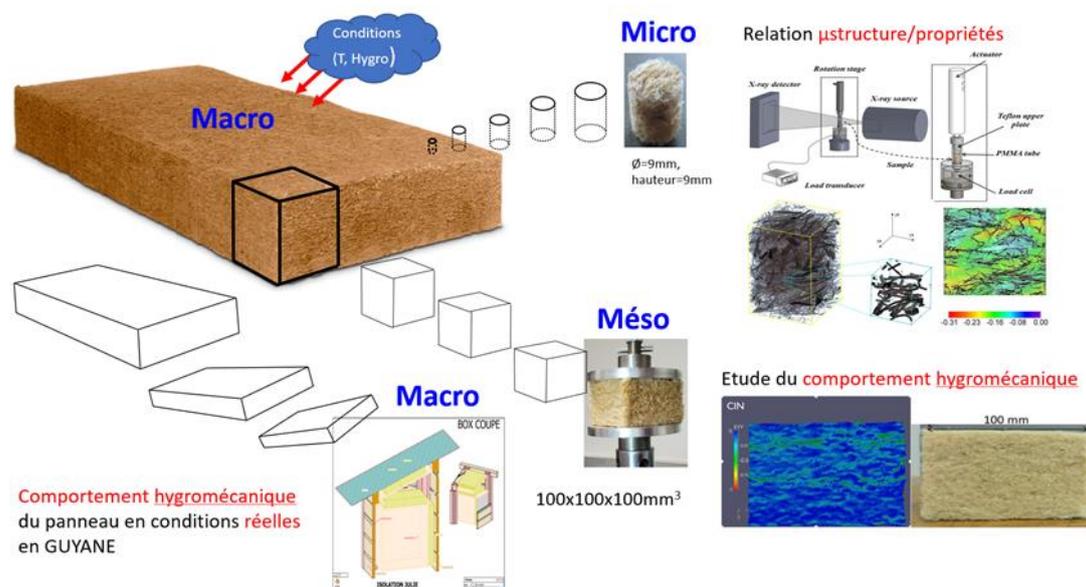


Fig. 1 : Démarche expérimentale multi-échelle pour étudier l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques et dimensionnelles des panneaux isolants

Remerciements

Ce travail est supporté par l'ANR *PANTHER²Guyane* 22-CE43-0019.

Références

- Bossu J., Moreau J., Delisée C., Le Moigne N., Corn S., Sonnier R., ... & 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*, 1-15.2
- Tran H., Doumalin P., Delisée C., Dupré J.C., Malvesto J., Germaneau A. (2013) 3D mechanical analysis of low-density wood based fiberboards using X-ray microcomputed tomography and Digital Volume Correlation, *Journal of Materials Science*, 48, pp 3198–3212, 10.1007/s10853-012-7100-0.

Tran H., Delisée C., Doumalin P., Dupré J.C, Germaneau A., Malvestio J. (2013). Étude du comportement mécanique de matériaux isolants a base de fibres de bois : caractérisation a partir de techniques d'imagerie non destructives. CFM - 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France. hal-03439796.

Reconstruction 3D de l'orientation des fibres autour d'un nœud de Douglas

PENVERN Hélène¹, POT Guillaume¹, VIGUIER Joffrey¹, COLLET Robert¹,
DEMOULIN Leyne¹, ROUX Benjamin¹, OLSSON Anders², HU Min²

¹ Arts et Métiers Sciences et Technologies, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France

² Department of Building Technology, Linnaeus University
351 95 Växjö, SWEDEN
helene.penvern@ensam.eu

Mots clés : déviation des fibres ; cernes de croissance ; mesure ; classement machine ; angle de plongée

Contexte et objectifs

Pour pouvoir utiliser le bois comme bois d'œuvre, il est nécessaire de certifier ses propriétés mécaniques. Or, le bois étant issu du vivant, l'histoire de l'arbre est inscrite dans la matière. Chaque branche naissante, chaque coup de vent que l'arbre subit, le sol qui l'a nourri... tous ces éléments vont impacter les propriétés mécaniques du bois. Le bois est un matériau fortement anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la direction de sollicitation. De fait, le bois possède de bien meilleures propriétés mécaniques (>10 fois) dans le sens de ses fibres, que transversalement à celles-ci, si bien que la résistance d'un élément structural en bois dépend très fortement de l'orientation des fibres en son sein, et a fortiori, du nombre, de la taille et de la configuration des nœuds présents, à l'origine de déviation des fibres par rapport à l'axe principal du bois scié.

Les machines de classement actuelles, qui permettent de certifier la classe de résistance des bois sciés, déterminant les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques utiles au dimensionnement des structures, peuvent être équipées de rayons X, pour mesurer la densité, de caméra couleurs, pour repérer les défauts, et de lasers, pour mesurer l'angle des fibres (Olsson et al. 2018). Les lasers projettent un point lumineux en surface qui se diffuse dans le sens des fibres par effet trachéide, de sorte que l'analyse de la forme des points laser permet de connaître l'orientation des fibres en surface. Mais c'est bien là qu'est la limite de cette mesure qui ne permet que de mesurer l'angle projeté des fibres en surface des bois, et non l'orientation réelle, en 3D, des fibres. Des recherches en cours cherchent à utiliser la tomographie aux rayons X des billons à cette fin (Huber et al. 2022, Hu et Olsson 2023). Malheureusement, si cette technologie permet bien d'observer les cernes de croissance à l'échelle d'une planche, elle reste coûteuse, et la résolution est telle qu'il n'est pas envisageable d'observer simultanément les fibres. Dès lors, une idée serait d'estimer l'orientation réelle des fibres en utilisant un modèle de déviation des fibres ajusté à partir des mesures des angles de surface. Cette option a été explorée par Lukacevic et al. (2019). Ces auteurs ont choisi d'utiliser le modèle détaillé par Christiana Foley (2003) dans son manuscrit de thèse et qui décrit l'angle des fibres dans le plan longitudinal-tangentiel par analogie avec un écoulement de fluide ("Flow-grain analogy", Philipps et al. 1981), et sur l'hypothèse logique que les fibres doivent suivre les cernes de croissance. Christiana Foley (2003) fournit un modèle mathématique (équations polynômiales d'ordre 2 pour décrire la position du centre du nœud et le diamètre du nœud, équation exponentielle pour décrire la courbure des cernes de croissance à proximité des nœuds), en se basant sur des vues en coupe de 11 nœuds d'épicéas.

Grâce à un algorithme de reconstruction des nœuds, combiné au modèle de déviation des fibres, Foley (2003) et Lukacevic et al. (2019) ont démontré qu'il était possible par éléments finis d'obtenir des profils de raideur effectifs des bois sciés, mais également, que le résultat était fortement impacté par les paramètres du modèle de déviation des fibres autour des nœuds (zone grise, Fig. 1), et la position supposée de la moelle du tronc, d'où la nécessité de mieux maîtriser ces derniers. Suite aux conclusions de cette étude, faible influence des paramètres de l'ovale de Rankine, impact fort de la géométrie du nœud, Habite et Olsson (2022) ont souhaité simplifier le modèle de Foley en ne définissant la géométrie des fibres qu'à partir de la définition des cernes de croissance, en supposant que les fibres suivent le chemin le plus court depuis la base jusqu'au sommet du tronc. Malheureusement, il conclut de cette tentative qu'il lui manque des données d'orientation 3D des fibres qui puissent lui permettre de juger de la qualité de son modèle. Ce constat est partagé par Hu et Olsson (2023) suite à une modélisation des fibres à partir de données tomographiques d'un bois scié.

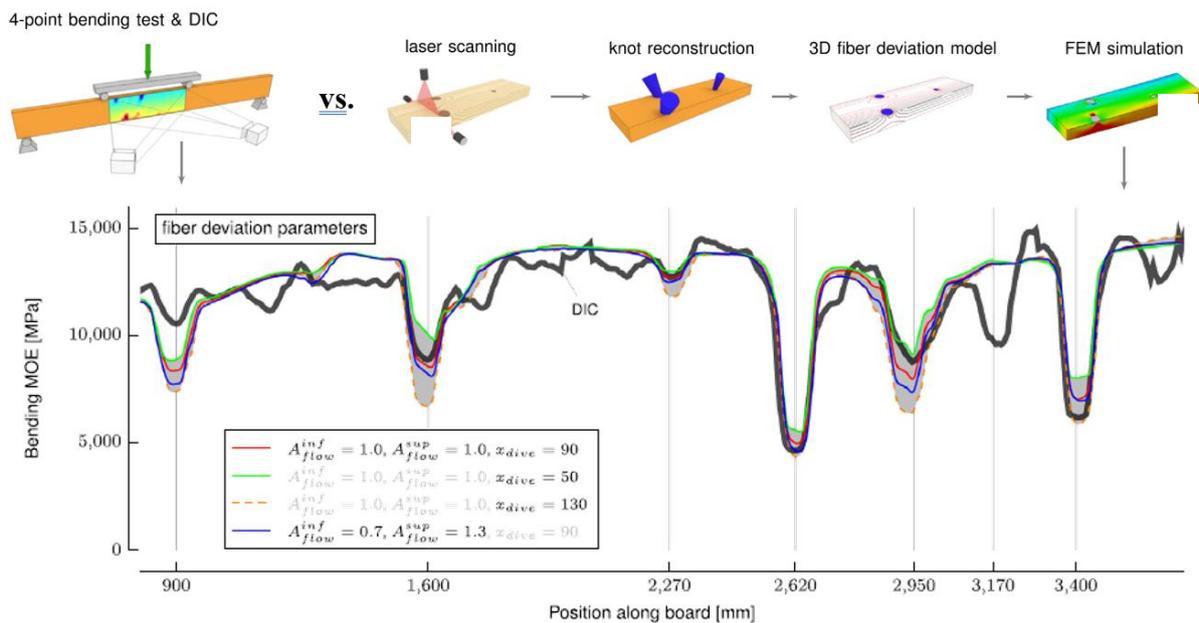


Fig. 1 : Extrait du résumé graphique et résultats des simulations éléments finis suite au modèle combiné Foley + reconstruction des nœuds comparés aux résultats de la corrélation d'image issus d'un test de flexion 4 points réalisés par Lukacevic *et al.* (2019)

L'objectif du travail présenté est donc de répondre à ce besoin, en développant une méthode de laboratoire permettant d'évaluer l'orientation 3D réelle des fibres.

Matériel et méthode

Un bloc de bois avec un nœud plat complet, isolé, sain et partiellement adhérent a été coupé à partir d'un échantillon de sapin Douglas. Ce bloc a d'abord été raboté dans la direction tangentielle, jusqu'au centre du nœud. Après chaque rabotage, des scans couleur ont été effectués ; puis une mesure par points lasers, des angles projetés des fibres de la dernière face visible présentant la coupe du nœud, réalisée. Le bloc a ensuite été raboté dans la direction radiale, depuis la naissance du nœud, c'est-à-dire depuis l'emplacement approximatif de la moelle, jusqu'à l'écorce (Fig. 2a), tous les 2 millimètres. Après chaque rabotage, un scan couleur et une mesure par points laser ont été effectués afin d'obtenir une cartographie complète de l'angle des fibres dans le plan LR et des couleurs de l'ensemble de l'échantillon (Figs. 2b et c).

A l'aide de segmentation morphologique sur les scans couleur (Fig. 2d), les cernes de croissance du bloc de bois ont pu être reconstruits et les normales aux cernes déterminées (Fig. 2e). Puis, en utilisant les angles de fibres projetés dans le plan LR, nous avons pu déterminer l'orientation des fibres en 3D pour l'ensemble de l'échantillon, utilisant le fait que les fibres doivent rester tangent aux limites de cernes (Fig. 2f). La formule (encadré vert) utilisée est la suivante :

$$\vec{v} = \vec{u} - \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{n_z} \vec{z} \rightarrow d\vec{v} = d\vec{u} + \left(d\vec{u} \cdot \frac{\vec{n}}{n_z} \right) \vec{z} + \frac{\vec{u} \cdot (n_z \cdot d\vec{n} - dn_z \cdot \vec{n})}{n_z^2} \vec{z} = \delta_{du} + \delta_{ndu} + \delta_{udn} \quad (1)$$

où \vec{v} est la direction de la fibre, \vec{u} la direction mesurée de la fibre dans le plan de rabotage, et \vec{n} est la direction normale au cerne (on obtient bien $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$).

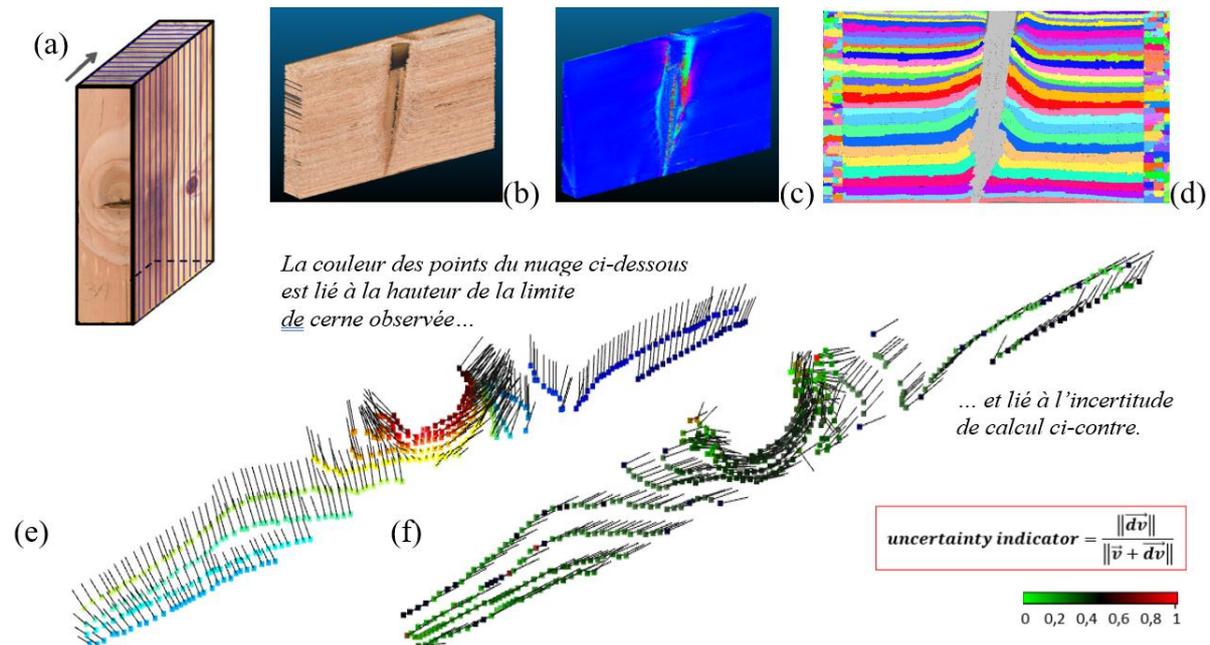


Fig. 2 : (a) Illustration des plans de rabotages successifs de l'échantillon de Douglas ayant permis un cartographie couleur (b) et d'angle projeté longitudinal-tangentiel (c) de l'échantillon. Les scans couleurs ont ensuite été segmentés de manière à identifier les différents cernes de croissance (d). Des limites de cernes détectées est extrait un nuage de points sur lequel une estimation de la normale est réalisée (e) permettant le calcul de l'orientation 3D (f).

Résultats, conclusions et perspectives

En différenciant l'équation (1) il est possible de faire apparaître trois termes, dont les deux premiers (encadrés rouges) sont liés à l'incertitude de mesure, et le troisième (encadré bleu) à l'incertitude sur la direction normale aux cernes. On obtient que ce dernier terme est largement dominant et tend vers l'infini lorsque n_z tend vers 0, c'est-à-dire lorsque les plans de rabotages sont perpendiculaires aux cernes. Néanmoins, on peut observer que les résultats obtenus (Fig. 3) semblent satisfaisants pour des valeurs d'angle de plongée β dans le plan LT allant jusqu'à 50 degrés.

Cette méthode nous a donc permis d'obtenir une mesure véritable de l'angle des fibres réels d'un échantillon de douglas. Nous espérons la reproduire afin de créer de nouvelles données et ainsi permettre d'évaluer les modèles actuels de déviation des fibres du douglas ou d'autres essences.

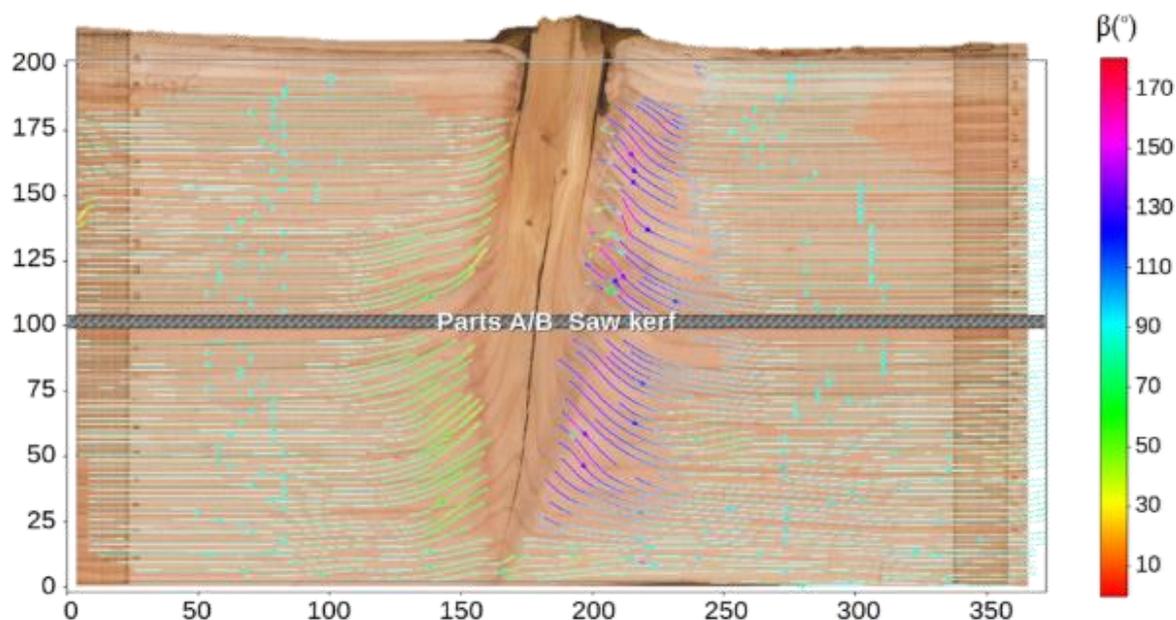


Fig. 3 : Streamplot de l'orientation des fibres déterminées par le calcul superposé au scan couleur de face rabotée correspondante.

Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet EffiQuAss ANR-21-CE10-0002-01).

Références

- 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 and European oak. *Annals of Forest Science*, 75(4): 1-18.
- Huber J.A., Broman O., Ekevad M., Oja J., Hansson L. (2022) A method for generating finite element models of wood boards from X-ray computed tomography scans. *Computers & Structures*, 260: 106702.
- Hu M., Olsson A. (2023) Application of data from X-ray CT scanning and optical scanning to adjust model parameters for growth surfaces geometry surfaces and fibre directions in Norway spruce, In 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Wood Mechanics (CompWood 2023), September 5-8, 2023, Dresden, Germany (pp. 143-144).
- Lukacevic M., Kandler G., Hu M., Olsson A., Füssl J. (2019) A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards. *Materials & Design*, 166: 107617.
- Foley C. (2003) Modeling the effects of knots in structural timber. PhD Dissertation at Lund Institute of Technology.
- Habite T., Olsson A. (2022) Modelling of Knots and 3d Fibre Orientation within Timber Boards Based on Information Obtained from Optical Scanning. *SSRN Electronic Journal*. doi: 10.2139/ssrn.4110671.
- Philipps G.E., Bodig J., Goodman J.R. (1981) Flow-grain analogy, *Wood Science* 14(2): 55-64.

Élaboration d'une résine époxy biosourcée

SANCHEZ Alexandre¹⁻², CASTETS Laurent², ROBLES Eduardo¹

¹IPREM – Université de Pau et des Pays de l'Adour, E25 UPPA, CNRS, IPREM,
Mont de Marsan, France

²Gascogne Bois, Rte de Cap de Pin, 40210 Escource, France
alexandre.sanchez@univ-pau.fr

Mots clés : acide, biosourcé, catalyseur, époxy, huile de lin, platelage, pin maritime, spectroscopie infrarouge

Contexte et objectif

Le projet TERRASSUR a pour but la conception d'un platelage antidérapant issu de produits locaux de la région Sud-Ouest. Le platelage antidérapant devra être conçu via incrustation d'une matrice polymère biosourcée et d'une charge antidérapante. Le polymère retenu pour la conception de la matrice est un thermodurcissable biosourcé de type époxy.

L'objectif du projet sera donc la synthèse d'un polymère biosourcé de type époxy (Fig. 1). Le choix s'est porté sur l'utilisation d'une huile végétale transformée en prépolymère, l'huile de lin. La matrice thermodurcissable est obtenue par réticulation des chaînes de l'huile de lin en présence d'un catalyseur et d'acides (Di Mauro et al. 2022, Qi et al. 2018, Soon-Jin et al. 2004).

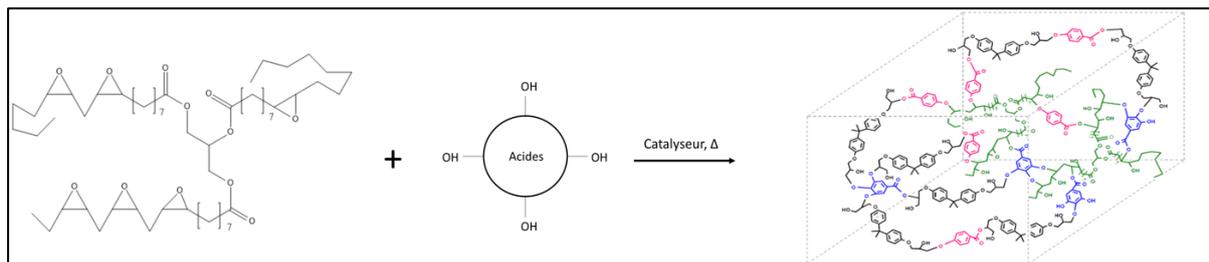


Fig 1 : Schéma réactionnel de préparation de la résine époxy biosourcé

Matériel et méthode

Matériel. L'huile de lin déjà transformée en prépolymère époxy a été fournie par Hobum Oleochemicals GmbH. L'acide gallique, l'acide hydroxybenzoïque et la pyridine (catalyseur) ont été achetés chez de Sigma-Aldrich et l'éthanol, utilisé en tant que solvant, chez Fisher Scientific.

Méthode. La masse exacte de chaque produit est définie par un calcul de ratio stœchiométrique de 1 entre l'huile de lin époxydée (ELO), l'acide gallique (AG) et l'acide hydroxybenzoïque (AHB). Le Tab. 1 présente les masses exactes en produits de chaque système, pour différents taux d'acides. Les masses exactes en acides ont été pesées dans un bécher de 50 mL avec l'ajout de 4 mL d'éthanol.

Tab. 1 : Proportion massique des réactifs pour chacun des systèmes

| Systèmes | Ratio AG/AHB | Masse ELO (g) | Masse AG (g) | Masse AHB (g) | Masse pyridine (g) | Volume éthanol (mL) |
|----------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|---------------------|
| A1 | 1/0 | 4,7 | 1,3 | 0 | 0,1 | 4 |
| A2 | 0,9/0,1 | 4,7 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 4 |
| A3 | 0,7/0,3 | 4,5 | 1,0 | 0,5 | 0,1 | 4 |
| A4 | 0,5/0,5 | 4,4 | 0,8 | 0,8 | 0,1 | 4 |

Le mélange est chauffé à une température de 60 °C sous agitation (100 rpm). La masse exacte en ELO est ensuite rajoutée, après dissolution des acides. Le mélange est de nouveau agité à 60 °C, jusqu'à l'apparition d'un bullage. Le mélange est ensuite passé à l'évaporateur rotatif pour une température de 60 °C, afin d'enlever la totalité du solvant. Les systèmes sont ensuite coulés dans un moule en silicone, mis à l'étuve et cuits suivant différents cycles de cuisson (Tab. 2).

Tab. 2 : Description des différents cycles de cuisson

| Cycles | t ₀ | t ₁ | t ₂ | t ₃ | t ₄ | t ₅ | t ₆ | t ₇ |
|--------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Températures | Ambiante | 90 °C | 95 °C | 100 °C |
| Temps | Sortie de rotavapor | 1 h | 1 h | 1 h | 1 h | 1 h | 1 h | 1 h |

Résultats et discussions

La cinétique de réticulation de chaque système a été suivi par spectroscopie infrarouge (FTIR-ATR) après chaque cycle de cuisson (Sahoo *et al.*, 2015). Le taux de conversion α est calculé par différence d'aire des pics d'absorption de la fonction oxirane à 823 cm⁻¹, entre le système non traité (A_{823})_{uncured} et le système traité (A_{823})_{cured} :

$$\alpha = 1 - \frac{(A_{823})_{\text{cured}}}{(A_{823})_{\text{uncured}}}$$

La Fig. 2 illustre l'évolution du taux de conversion des systèmes A1, A2, A3 et A4 après chaque cycle de cuisson.

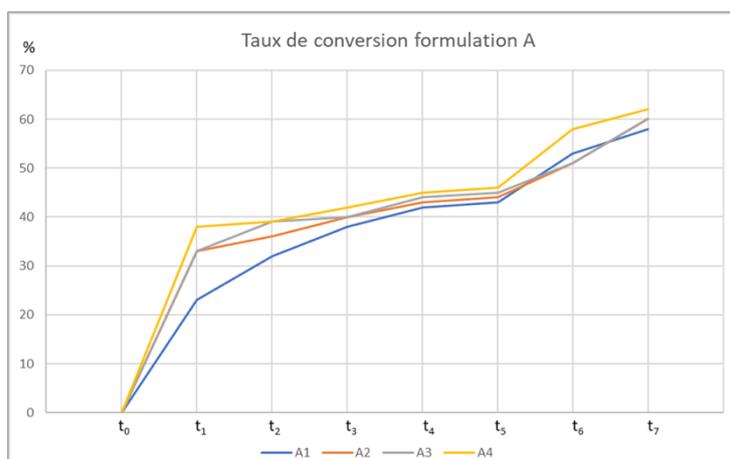


Fig. 2 : Taux de conversion des systèmes A1, A2, A3 et A4 après chaque cycle de cuisson.

On remarque dans un premier temps, une différence de taux de conversion après seulement une heure de cuisson à 90 °C. En effet, le taux de conversion du système A4 comprenant 50 % en acide hydroxybenzoïque est nettement meilleur que le taux de conversion du produit ne comprenant que l'acide gallique, avec un pourcentage de 38 % pour 24 %. Cet écart est réduit de moitié après la 2^{ème} heure de cuisson.

On constate tout de même une uniformité dans les résultats obtenus : après cinq heures de cuisson à 90 °C, les systèmes réticulent jusqu'à un seuil limite compris entre 42 et 47 %. Ce seuil est dépassé par augmentation de la température de 5 à 10 °C. Le changement de ratio entre l'acide gallique et l'hydroxybenzoïque n'a pas vraiment d'influence sur le taux de conversion α , hormis en début de cuisson.

Le spectre infrarouge (Fig. 3) représente l'avancement cinétique du système A1 après chaque étape de cuisson. Dans notre cas, la diminution de l'intensité des pics de la zone à 823 cm⁻¹ est synonyme de réticulation. En effet, l'étape de cuisson amène à l'ouverture des cycles époxy et

à la création de liaison ester ou éther, entre l'huile et l'acide. Le réseau tridimensionnel est ainsi créé par transformation des fonctions époxy en fonction ester/éther. Cette transformation est visible par réduction de l'intensité des pics à 823 cm^{-1} .

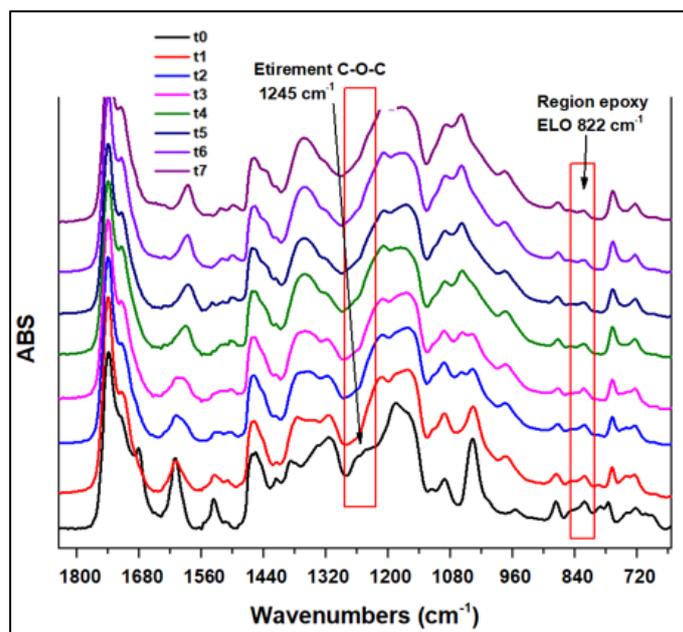


Fig. 3 : Suivi cinétique en FTIR-ATR du système A1

Conclusion et perspectives

L'utilisation de l'huile de lin époxydée en présence d'acides et d'un catalyseur, a permis l'obtention de thermodurcissables de type époxy, biosourcés entre 85 et 98 %. La température de réticulation ne dépassant pas les 100 °C , permet l'utilisation de ces thermodurcissables pour des applications fragiles à haute température. Il est donc possible d'utiliser ces époxy pour des applications utilisant du bois, comme les platelages. Des analyses thermogravimétriques et de traction sont à prévoir pour la suite du projet.

Remerciements

Je remercie Eduardo Robles (responsable scientifique) ainsi que Laurent Castets (responsable R&D Gascogne bois) de m'avoir suivi au cours de ce projet. Je remercie l'ANR et Gascogne Bois pour le financement du projet. Je remercie l'UPPA pour m'avoir donné accès à leurs équipements.

Références

- Di Mauro C., Genua A., Mija A. (2022) Fully bio-based reprocessable thermosetting resins based on epoxidized vegetable oils cured with itaconic acid. *Industrial Crops & Products* 185.
- Qi M., Xu Y.J., Rao W.H., Luo X., Chen L., Wang Y.Z. (2018) Epoxidized soybean oil cured with tannic acid for fully bio-based epoxy resin. *RSC Adv.*, 8, 26948.
- Soo-Jin P., Jin F.L., Lee J.R. (2004) Synthesis and Thermal Properties of Epoxidized Vegetable Oil – *Macromol. Rapid Commun.* 25, 724–727.
- Sahoo S.K., Mohanty S., Nayak S.K. (2015) Toughened bio-based epoxy blend network modified with transesterified epoxidized soybean oil: synthesis and characterization, *RSC Adv.*, 5, 13674.

Production of mycocomposite from wood industry waste

AGUILAR Kyle¹, FIGEL Laura¹, SAKER Safwan², SOUFFLET Lucas², BROSSE Nicolas¹,
BESSERER Arnaud¹

¹Université de Lorraine, LERMAB, France

²CRITT, 27 Rue Philippe Séguin, 88000 Épinal, France

kyle.aguilar@univ-lorraine.fr

Key words: Mycocomposite; Hydrothermal pretreatment; Fungus; Wood waste; Recycling

Contexte et objectifs

Le succès des meubles en kit assemblés à partir de panneaux de particules et de MDF a pour conséquence une augmentation des déchets qui en résultent. Ces déchets sont appelés déchets d'éléments d'ameublement (DEA). Pour la partie bois, les DEA contiennent entre autres des résines telles que l'urée-formaldéhyde (UF) qui sert de liant lors de la fabrication des panneaux de particules et de MDF et complique leur valorisation en fin de vie. Cependant, les DEA bois sont potentiellement utilisables pour la production de matériaux dotés de propriétés multiples et à très faible impact environnemental : les mycocomposites. Il s'agit de matériaux composites constitués par des particules de matière lignocellulosique liées entre elles par le mycelium d'un champignon ce qui en fait un matériau 100% biosourcé et biodégradable. Dans le contexte d'un modèle d'économie circulaire basé sur le « zéro déchet » ces matériaux suscitent un intérêt grandissant (Mohd Fairus et al. 2022).

L'objectif principal de ce travail est de produire des mycocomposites à partir de particules de bois recyclé issues de l'industrie du panneau.

Les mycocomposites sont généralement produit à partir de résidus de biomasses agricoles. Le premier défi de ce travail de thèse qui s'inscrit dans le projet Profex (Ecomobiler) est donc de produire de manière reproductible et efficace des mycocomposites dans un système modèle bois/champignon. Cela nécessite de caractériser plus précisément le développement du champignon dans des particules de bois ayant subi ou non un prétraitement hydrothermal. Les connaissances acquises sur ce modèle seront alors transférées à la biomasse industrielle d'intérêt constituée de bois issu du recyclage.

Matériel et méthodes

Prétraitement hydrothermal de la biomasse

Le prétraitement hydrothermal utilisé est un procédé utilisé pour le prétraitement de la biomasse lignocellulosique avant sa bioconversion enzymatique en produits d'intérêt. Il s'agit d'un procédé versatile dont les effets sur la biomasse sont dépendants des conditions de réaction. Des expériences préliminaires ont montré que des conditions modérées du prétraitement modifient la porosité des fibres et des particules et semblent permettre une meilleure croissance du champignon.

Culture du champignon et production des mycocomposites :

La culture se décompose en deux parties : la pré-culture et la croissance du mycocomposite qui s'apparente à une fermentation en milieu solide. Les conditions de croissance et la pré-culture sont bien documentées dans la littérature mais la phase d'inoculation est quant à elle peu expliquée. La croissance du champignon durant la pré-culture ou la culture sur le substrat est

réalisée dans des conditions de croissance spécifiques et favorables selon l'espèce fongique choisie (dans notre cas *T. versicolor* CTB 863 A) (Elsacker et al. 2020 & Lelivelt et al. 2015). Une température comprise entre 25°C et 30°C permet d'obtenir une croissance optimale pour l'espèce *Trametes versicolor*. La pré-culture peut se faire en milieu solide ou liquide (avec ou sans agitation). Le choix de la méthode de culture reste important et impacte également les propriétés du matériau final (Elsacker et al. 2019). Certaines espèces fongiques telles que le *Trametes versicolor* sont cependant plus propices à une culture liquide que d'autres (Elsacker et al. 2019 & Dutton et al. 1993). La phase d'inoculation intervient une fois qu'une quantité suffisante de biomasse fongique a été récoltée. Il s'en suit la phase de culture du mycocomposite. Les méthodes diffèrent également et sont nombreuses (Attias et al. 2020). Dans notre cas comme la grande majorité des méthodes, la croissance sur le substrat s'effectue dans un moule de manière à obtenir la forme du matériau voulue pendant la croissance (Lelivelt et al. 2015). Ayant comme objectif la production d'un panneau, nous réaliserons une étape de pressage qui sera réalisée à la fin de la croissance.

Résultats et discussion

Le prétraitement hydrothermal est connu pour modifier les propriétés physico-chimiques de la paroi du bois (Besserer et al., 2022 Troncoso-Ortega et al., 2021). Afin d'évaluer l'effet d'un traitement hydrothermal effectué sur des particules de hêtre sur le développement de *T. versicolor*, des mycocomposites ont été réalisés en utilisant ces deux types de biomasses comme substrat de croissance pour le champignon. L'observation des matériaux obtenus après 5 j de croissance (Fig. 1 et 2) montre que *T. versicolor* a une croissance plus importante et plus homogène sur les particules traitées (Fig. 2).



Fig. 1 : Mycocomposite à partir de biomasse native



Fig. 2 : Mycocomposite à partir de biomasse prétraité

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) du mycocomposite montre une densité de mycélium et une colonisation des particules plus importantes dans les mycocomposites réalisés à partir de particules traitées (Fig. 3b, 4b). L'observation au MEB des particules avant et après le prétraitement a montré un défibrage et une modification structurelle des particules (Fig. 3a,c, 4a,c).

Ces observations ont été complétées par des analyses en spectrométrie proche infrarouge (NIRS). Cette technique non destructive permet de mettre en évidence une forte modification des particules lors du traitement hydrothermal. Les résultats de l'imagerie et du NIRS sont donc corrélés. Ces données constituent une base pour la modélisation de croissance du champignon dans les particules en vue d'optimiser la production de mycocomposites

Le prétraitement hydrothermal affectant l'ultrastructure et la physico-chimie de la paroi, nous avons fait l'hypothèse d'un enrichissement en nutriments et en molécules signal de la phase liquide obtenue lors du prétraitement. Afin de tester l'activité biologique de cette phase liquide lors de la phase de production du mycocomposite, le milieu de culture habituellement utilisé, a

été substitué par cette phase liquide. Au niveau qualitatif, une nette amélioration de la croissance fongique a été observée (Fig. 5, 6).

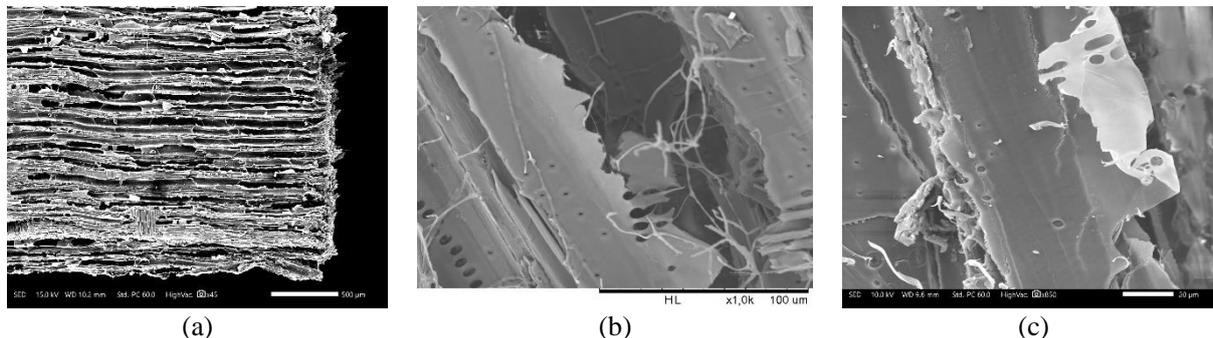


Fig. 3 : Images MEB de hêtre non traité : (a) particule de hêtre natif ; (b) présence du champignon dans un mycocomposite hêtre natif ; (c) surface d'une particule non traitée

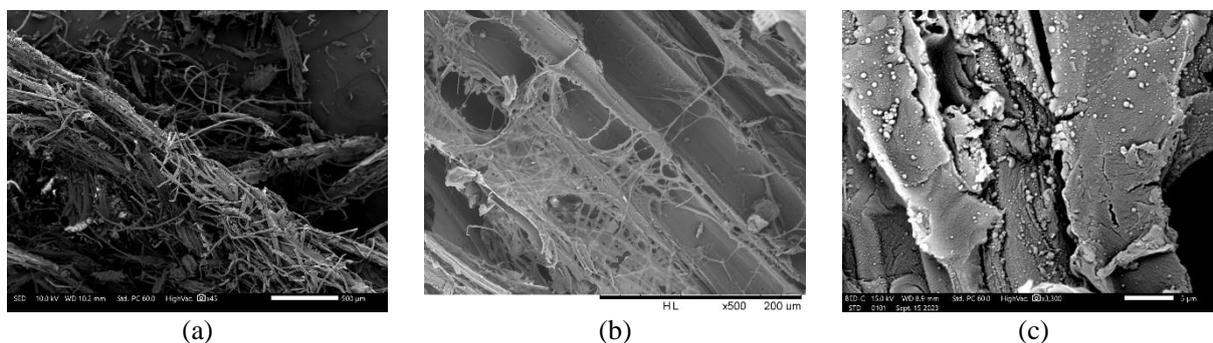


Fig. 4 : Images MEB de hêtre traité : (a) particule de hêtre prétraitée ; présence du champignon dans un mycocomposite hêtre prétraité ; surface d'une particule prétraitée



Fig. 5 Mycocomposite hêtre natif sans ajout supplémentaire



Fig. 6 : Mycocomposite hêtre natif avec ajout d'effluent du traitement hydrothermal.

De ce fait, des analyses des phases liquides ont été réalisées pour tenter de mieux comprendre ce phénomène et d'identifier les molécules présentes dans les phases liquides ayant un potentiel inhibiteur ou stimulateur sur la croissance de *T.versicolor*.

D'une part, le résultat d'une analyse DNS nous a permis d'observer un taux de sucre important dans les phases liquides. Ce résultat ainsi que les mesures de masses sèches des effluents dans lesquelles on trouve une concentration de 10,02 g/L de molécules justifie que l'analyse de ces effluents soit un élément important pour une croissance rapide du champignon et permettrait d'obtenir une production rapide de mycocomposite. Pour ce faire, des analyses par HPTLC ont été réalisés dans le but d'identifier les éléments présents dans les différentes phases liquides notamment les molécules inhibitrices ou stimulatrices de croissance. Des essais en réalisant des dérivations et migrations différentes ont montré que l'on retrouve un nombre important de molécules différentes dans les effluents. L'optimisation de la méthode d'HPTLC ayant débuté, a pour objectif d'approfondir l'analyse des molécules et de leurs effets sur la croissance

fongique, avec un couplage avec d'autres méthodes d'analyse comme la chromatographie ionique pour l'analyse approfondie des sucres.

D'autre part, des analyses sur l'utilisation des effluents pour substituer le milieu de culture liquide standard par ces derniers ont été menées. En supplément du résultat précédent sur l'amélioration de croissance avec l'ajout d'effluent (Fig. 5 et 6), les tests d'inhibition n'ont montré aucun effet inhibiteur. Des cultures liquide avec un milieu de culture composé d'effluent du prétraitement ont permis d'obtenir une croissance fongique plus importante qu'avec un milieu standard (Fig. 7).

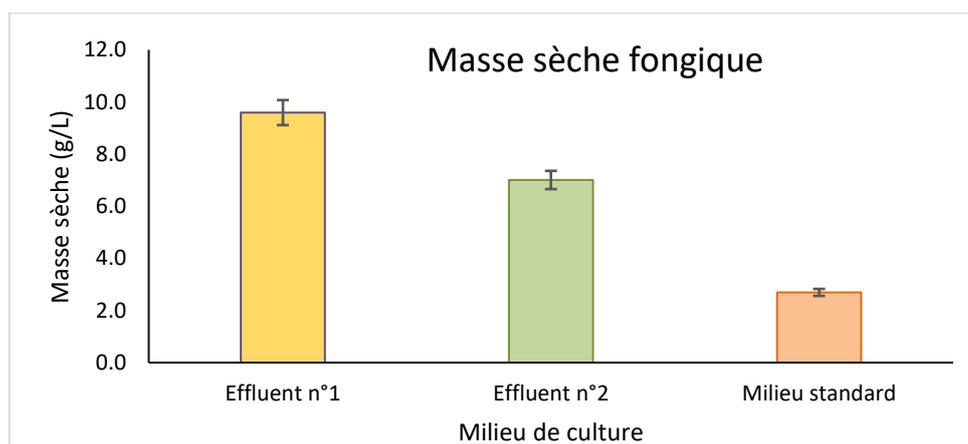


Fig. 7 : Masse sèche de champignon en fonction du milieu de culture liquide

En parallèle de l'étude des mycocomposites à partir de biomasse de hêtre, la production de mycocomposite avec des déchets de l'industrie du bois a été étudiée.

Dans un premier temps, aucune croissance de *T.versicolor* n'a été observée sur le bois recyclé (Fig. 8). L'effet inhibiteur de croissance a été écarté avec l'observation de croissance de *T.versicolor* lors d'essais d'inhibition avec le bois recyclé et les effluents. Dans un second temps des analyses menées en microscopie et en spectroscopie infrarouge ont montré que les déchets de l'industrie du bois utilisés comme substrat sont composés en majorité de résineux. Une étude intermédiaire a été menée sur le prétraitement de différentes essences et a permis de montrer que le prétraitement impacte la croissance de *T.versicolor* sur les essences de manières différentes. Une croissance a été observée avec un substrat de bois recyclé et prétraité et a permis d'aboutir par la suite à la production de mycocomposite (Fig. 9).



Fig. 8 : Mycocomposite avec du bois recyclé non traité



Fig. 9 : Mycocomposite avec du bois recyclé et prétraité – dimensions : 150x150x50mm

Conclusion et perspectives

Avec l'étude de la biomasse solide et des effluents, on peut affirmer que le prétraitement utilisé a un effet significatif dans le processus de production de myco-composites. Non seulement les particules traitées permettent d'accroître la colonisation des particules par le champignon mais les effluents, semblent également jouer un rôle de stimulateur de croissance important. Ainsi le couplage des deux nous permet d'améliorer de façon drastique la croissance du champignon et ainsi de remplir l'objectif d'une utilisation totale des éléments produits par le prétraitement hydrothermal à partir d'une biomasse bois disponible localement. De plus, le prétraitement hydrothermal joue un rôle important dans l'utilisation de bois recyclé comme substrat de croissance et permet d'obtenir une croissance de *T.versicolor* sur le bois et la production de myco-composite.

Références

- Attias N., Danai O., Abitbol T., Tarazi E., Ezov N., Pereman I., Grobman Y.J. (2020) Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *J. Clean. Prod.* 246, 119037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>
- Besserer A., Obame S.N., Safou-Tchima R., Saker S., Ziegler-Devin I., Brosse N. (2022) Biorefining of *Aucoumea klaineana* wood: Impact of steam explosion on the composition and ultrastructure the cell wall. *Ind. Crops Prod.* 177, 114432
- Dutton M.V., Evans C.S., Atkey P.T., Wood D.A. (1993) Oxalate production by Basidiomycetes, including the white-rot species *Coriolus versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 39, 5–10. <https://doi.org/10.1007/BF00166839>
- 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. *Plos One* 14, e0213954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- Elsacker E., Vandeloock S., Van Wylick A., Ruytinx J., De Laet L., Peeters E. (2020) A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Sci. Total Environ.* 725, 138431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>
- Mohd Fairus M.J., Kamal Bahrin E., Natasha E., Arbaain N., Ramli N. (2022) Mycelium-based composite: a way forward for renewable material. *J. Sustain. Sci. Manag.* 17, 271–280. <https://doi.org/10.46754/jssm.2022.01.018>
- Lelivelt R.J.J. (2015) The mechanical possibilities of mycelium materials, p. 83.

Méthodologie de couplage des marqueurs chimiques et des marqueurs génétiques dans la traçabilité du bois. Cas du Tali, genre *Erythrophleum*

ARNAUD Maëlle^{1,2}, NDIADI BOUROUBOU Dyana¹, BOESCHOTEN Laura³,
ROCHA VENÂNCIO MEYER-SAN Barbara³

¹Institut de Recherches Agronomiques et Forestières (IRAF), CENAREST, Gabon

²Master Sciences du bois, Faculté des Sciences de Montpellier, France

³ Université de Wageningen, The Netherlands

maelle.arnaud01@etu.umontpellier.fr

Mots clés : Traçabilité ; Bois ; Commerce illégal ; Afrique centrale ; Déclarations de douanes ; Authentification ; Marqueurs chimiques ; Marqueurs génétiques ;

Contexte

La traçabilité du bois est un concept décrit par la norme ISO 8402 (1994) comme étant « l'aptitude à retrouver l'historique et l'utilisation ou la localisation d'un article ou d'une activité au moyen d'une identification enregistrée » (Fuentelba et al 2006). La traçabilité du « bois » et des « produits dérivés du bois » joue un rôle important dans la filière forêt-bois. En effet, celle-ci permet d'identifier le bois et de remonter jusqu'à son origine géographique et parfois même jusqu'à son lieu de récolte. L'exploitation du bois en Afrique centrale (Fig. 1) est considérée soit comme légale (CFAD, FSC, CITES), soit comme illégale (hors concession et ne respectant pas les conventions et les normes). De ce fait, certains producteurs de bois d'Afrique centrale (Fig. 2) font des déclarations de douanes frauduleuses afin d'infiltrer sur le marché les bois issus de l'exploitation illégale.



Fig. 1 : Carte présentant les pays d'Afrique centrale et l'étendue de la forêt du bassin du Congo



Fig. 2 : Concept de traçabilité et enjeux dans la filière forêt-bois en Afrique centrale

Ainsi plusieurs moyens sont mis en œuvre pour authentifier ces déclarations, mais présentent des limites. C'est pourquoi les méthodes scientifiques sont développées et s'imposent comme étant un moyen de contrôle plus efficient. Lors de ce stage réalisé à l'Institut de Recherches Agronomiques et Forestières au Gabon, nous avons étudié l'efficacité des marqueurs chimiques et des marqueurs moléculaires génétiques sur un cas d'étude du Tali (*Erythrophleum suaveolens* et *Erythrophleum ivorense*), sur son aire de répartition naturelle dans la zone côtière forestière de l'Afrique centrale et de l'Ouest (Kombila-Mouloungui 2019).

Matériel et méthode

Le Tali est le nom commercial désignant deux essences du genre *Erythrophleum*, *Erythrophleum ivorense* et *Erythrophleum suaveolens*. Ce sont deux essences endémiques d'Afrique centrale. Le genre *Erythrophleum* est hermaphrodite. Le bois de Tali est essentiellement utilisé pour faire des charpentes lourdes, ossatures, escaliers d'intérieur, parquets lourds, poteaux, piquets et des travaux hydrauliques (Gorel et al. 2015).

Dans un premier temps, les sites de prélèvement d'échantillons de Tali sont identifiés sur son aire de répartition géographique naturelle en Afrique centrale. Un plan d'échantillonnage est ensuite mis en place, récolte des échantillons de bois à cœur et de sol puis analyse de ceux-ci en laboratoire (Fig. 3, Boeschoten 2021).

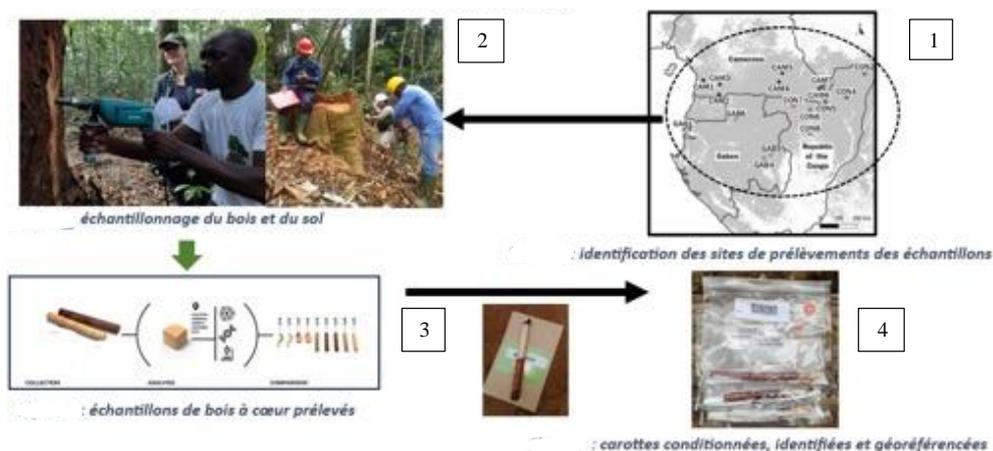


Fig. 3 : Protocole des méthodes chimiques : rapports isotopiques et dosage des multiéléments

Les échantillons sont analysés par deux méthodes : une chimique et une génétique. La méthode chimique consiste à mettre la poudre de bois en solution, puis à les analyser en spectrométrie de masse. Les résultats obtenus sont des rapports isotopiques permettant de déterminer des assignations des provenances géographiques des bois (Fig. 4). La méthode génétique consiste à amplifier les échantillons par PCR. Dans cette étude, les marqueurs génétiques utilisés sont les séquences SNP de l'ADN chloroplastique. On pourra ainsi séquencer les portions d'ADN amplifiées afin d'obtenir le génotypage des SNP. On pourra ainsi obtenir une cartographie génétique et déterminer les assignations géographiques des échantillons de bois (Fig. 5, Boeschoten 2021, Boeschoten et Rocha Venâncio Meyer-San in press)

Le couplage des méthodes chimiques à la méthode génétique consiste à croiser les résultats corrects d'assignation des échantillons de bois à leurs origines géographiques. Les résultats corrects d'assignation géographique sont obtenus en comparant les taux corrects d'assignation pour chaque méthode individuelle et le couplage des deux méthodes. Le couplage des méthodes peut se faire de quatre manières : 1) multiéléments/génétique 2) isotopes stables/génétique 3) multiéléments/isotopes stables et 4) les trois méthodes ensemble. Dans le cas du Tali, quatre jeux de données sont donc obtenus.

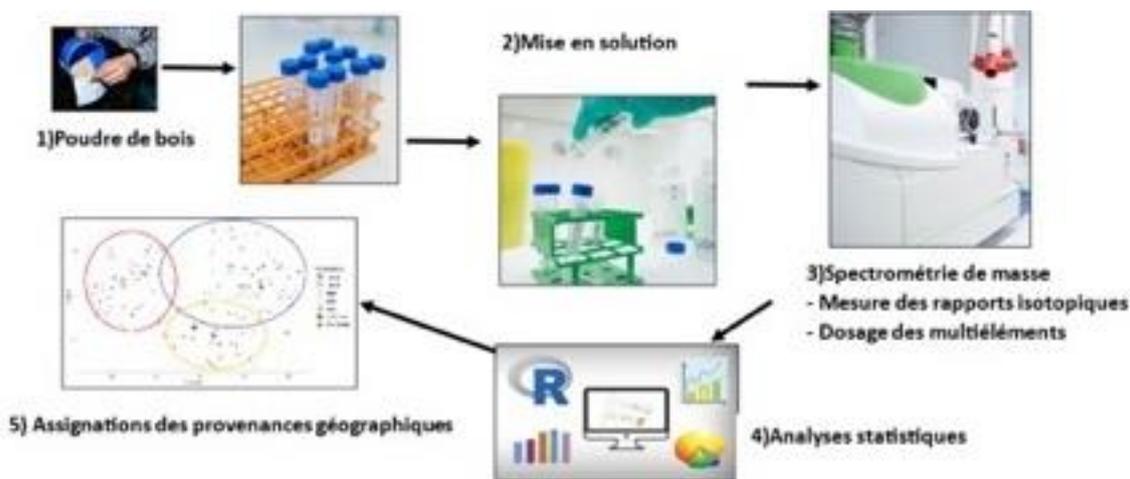


Fig. 4 : Protocole des méthodes chimiques : rapports isotopiques et dosage des multiéléments

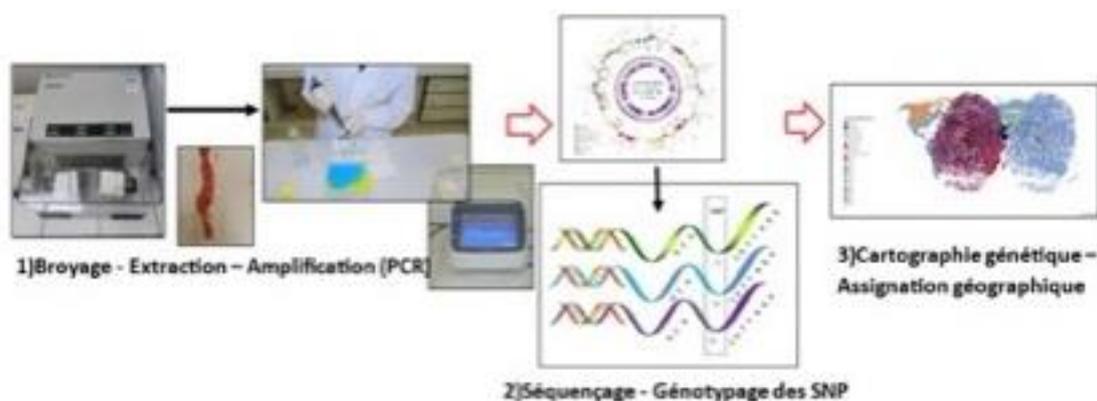


Fig. 5 : Protocole de la méthode génétique : polymorphisme nucléotidique (SNP) de l'ADN chloroplastique

Résultats

De toutes les approches combinées, il s'avère que la combinaison des trois apporte le meilleur taux d'assignation correct des arbres à leur site d'origine soit environ 88% d'individus correctement assignés. A la suite de quoi, viennent le couplage des données de génétique et des multiéléments, des isotopes stables et des multiéléments, de génétique et des isotopes stables ayant respectivement comme taux d'assignation correct des arbres 83%, 81,5% et 72% (Fig. 6). Malgré que certains arbres soient mal assignés, leurs lieux d'assignation, étaient toujours dans un rayon de 200 Km autour de leur site de récolte, c'est-à-dire à l'intérieur du même bloc forestier (Fig. 7, Boeschoten 2021, Boeschoten et Rocha Venâncio Meyer-San in press).

Discussion

L'approche combinée des méthodes chimiques et génétiques permet d'assigner un échantillon de bois brut ou manufacturé à son origine géographique avec environ 88% de précision. Pris séparément, ces trois méthodes acquièrent des résultats moins satisfaisants. L'association des trois méthodes (isotopiques, multiéléments et génétiques) renforce la précision du taux d'assignation correct des échantillons à leur lieu de récolte. Plus particulièrement dans la région Afrique Centrale, cette étude montre que le dosage de certains multiéléments, tels que : W (tungstène), Ba (baryum), Mo (molybdène), K (potassium) et Cr (chrome) s'avère être de meilleurs traceurs de la variabilité chimique des échantillons à l'échelle du site. Il s'avère qu'un facteur reste cependant limitant dans cette région, il s'agit du facteur environnemental. En effet, les variables climatiques, topographiques et telluriques *(altitude, précipitations, types de sols..) varient très peu à l'échelle régionale, ainsi il est plus fastidieux de préciser la provenance

géographique à l'échelle du site de récolte. Toutefois, cette approche combinée, assure la détermination du lieu de la « provenance géographique du bois » à l'échelle du bloc forestier régional, dans un rayon de 200 Km de son site de récolte réel.

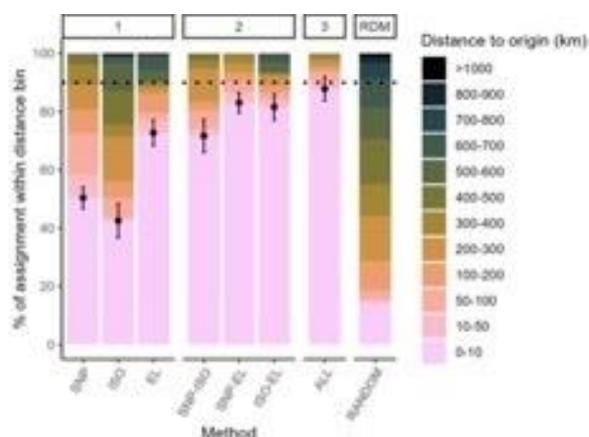


Fig. 6 : Taux d'assignation correct suivant la distance à l'origine par méthode

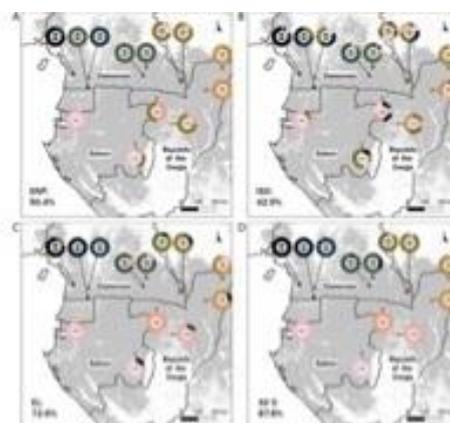


Fig. 7 : Résultats individuels des assignations par méthodes individuelles et combinées

Conclusion

La traçabilité du bois est un enjeu d'ordre mondial, du fait de sa contribution à la gestion durable de la biodiversité des forêts et à la résilience au changement climatique global. Cette étude est la première du genre qui combine des données chimiques aux données génétiques pour assigner les individus à leur lieu de provenance géographique. L'approche combinée des méthodes chimiques et génétiques pour la traçabilité du bois, par la qualité de ses résultats préliminaires, apparaît comme une alternative à retenir et à capitaliser pour les procédures de contrôle et de vérification dans la « filière bois » des pays producteurs de bois.

Remerciements

Je remercie : L'IRT de m'avoir accueilli ; Dr NDIADÉ BOUROUBOU Dyana pour m'avoir encadré et l'IRAF pour m'avoir financé ma sortie terrain dans le parc national de la Waka (Ngounié, Gabon) ; le GDR ; la Mobilité internationale FDS ; la Région Occitanie ; le LabEX NUMEV pour leur générosité envers le master Sciences du bois pour leur participation aux Journées Scientifiques 2023 du GDR Sciences du Bois.

Références

- Boeschoten L.E. (2021) Stable isotope ratios in wood show little potential for sub-country origin verification of two timbers from Central Africa, *Forest Ecology and Management*.
- Boeschoten L.E., Rocha Venâncio Meyer-San B. (in press) Combining genetic and chemical methods boosts accuracy of timber tracing at small spatial scales, *Forest Ecology and Management*.
- Fuentealba C., Choffel D., Charpentier P. (2006) Outils de contrôle non-destructif pour la traçabilité du bois
- Gorel, A.P., Fayolle A., Doucet J.L. (2015) Écologie et gestion des espèces multi-usages du genre *Erythrophleum* (Fabaceae-Caesalpinioideae) en Afrique (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 19, 415-429.
- Kombila-Mouloungui A.G. (2019) L'arrêt de l'exportation des grumes au Gabon : enjeux et perspectives, Thèse.

Projet OPTIUSE : Optimisation des doses efficaces à appliquer pour garantir les performances des bois autoclavés en fonction des usages et des durées de vie ciblés

RUBIO Bernadette¹, ANSARD David¹, FORTERRE Jean-Denis², LORIEAU Christophe³,
GALLIEN Marlène⁴, EPINAT Eric⁴, LE BAYON Isabelle¹

¹Laboratoire BioForBois, FCBA, Allée de Boutaut, 33000 Bordeaux

²Fédération Nationale du Bois, 6 rue François 1er – 75008 Paris

³PIVETEAUBOIS La Vallée - BP 7 - Sainte-Florence - CS 30111 – 85140 Essarts-en-Bocage

⁴Rondino, 230 Rue de l'Industrie, Z.I. du Champ de Mars - 42600 Savigneux – France

bernadette.rubio@fcba.fr

Mots clés : Durabilité – Dégradations Biologiques – Optimisation des doses – Conception – Expérimentation terrain

Contexte et objectifs

Le bois, en tant que matériau organique renouvelable et naturel occupe une place importante dans diverses branches de l'industrie en particulier dans le domaine de la construction et de l'ameublement. Du fait de sa structure et sa composition chimique, le bois est un matériau sensible aux attaques biologiques. Lorsque le bois est utilisé en extérieur avec des expositions répétées aux humidifications, il y a des risques d'altération par des agents de dégradation biologiques tels que les champignons et les insectes. Ces risques peuvent être maîtrisés.

La durée de vie (ou durée de service) des produits en bois dépend principalement de la durabilité naturelle du bois, des systèmes de protection utilisés et de sa conception (Khademibami et Bobadilha 2022, Guide FCBA 2018).

L'utilisation de substances actives et produits biocides est soumise, en France comme dans tous les autres États membres de l'Union européenne, au Règlement (UE) n° 528/2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides. Ainsi, ne peuvent être utilisées que des substances actives autorisées dont l'approbation est périodiquement révisée. Depuis le 1^{er} juin 2007, la réglementation REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques) restreint l'utilisation de certains produits biocides.

L'industrie de la préservation du bois est soumise à des changements importants et rapides en raison en particulier des préoccupations environnementales et des réglementations qui en découlent (Schultz et al. 2007). Les produits de traitement préservation des bois appliqués en autoclave étant évalués selon des protocoles normalisés, ils peuvent ne pas tenir compte des conditions d'usage finales, ni de la durée de vie attendue. En effet, les doses d'application autorisées dans le cadre du règlement biocide, indiquées dans les autorisations de mise sur marché (AMM) le sont pour un usage dans une classe d'emploi donnée. De plus, dans le cadre de la Responsabilité Elargie des Producteurs (REP), la filière bois investit afin d'obtenir un classement des bois en fin de vie amélioré. Ainsi, les doses à utiliser pour protéger les bois peuvent être optimisées en fonction des usages.

Afin de garantir le maintien des performances mécaniques et esthétiques des matériaux bois tout au long de leur durée de service, il est indispensable d'optimiser les phases de conception et de mise en œuvre. Il est en particulier important de comprendre et de maîtriser les risques

liés à l'humidification des bois et de limiter le plus possible l'installation de cette humidité via les systèmes constructifs et/ou la conception drainantes des ouvrages (Guide FCBA 2018).

Le projet Optiuse est né de la volonté de pouvoir optimiser l'usage des produits de préservation des bois utilisés en extérieur. Le but de cette étude consiste, au travers une expérimentation terrain, à suivre et évaluer la résistance à la dégradation biologique d'ouvrages bois traités à différentes doses d'un produit certifié pour un usage en classe d'emploi 3.2 et 4. Il s'agit *in fine* d'étudier la possibilité d'utiliser des doses plus faibles que les pratiques actuelles, tout en maîtrisant les risques de sinistralité, pour des usages spécifiques. L'impact de la conception sur la durabilité de certains ouvrages bois du projet a également été étudiée à travers deux niveaux de conceptions, favorisant ou au contraire limitant les écoulements d'eau et les contacts directs bois/bois.

Matériel et Méthodes

Expérimentations terrain

Les expérimentations terrains sont menées sur deux sites du FCBA, sur l'île d'Oléron et à Bordeaux. Le choix de ces deux sites est conditionné en particulier par la présence dans l'environnement immédiat d'agents biologique susceptibles d'attaquer les ouvrages bois installés. Ainsi, sur le site d'Oléron la protection contre les champignons lignivores et les termites sera évaluée. Sur le site de Bordeaux, seule la protection contre les champignons lignivores sera étudiée puisque de précédentes études ont montré que dans des conditions d'usage hors sol en extérieur, après 10 ans d'exposition, c'était ce type d'attaques biologiques qui prévalaient.

Les facteurs environnementaux physiques qui influencent le développement des agents biologiques (humidité, température, rayonnement UV) seront quant à eux assez semblables entre les deux sites et représentatifs d'un climat océanique.

Ouvrages mis en œuvre

Les ouvrages exposés sur les deux sites d'expérimentation correspondent à des cas classiques d'utilisation des bois en extérieur : platelages, glissières de sécurité, clôtures et piquets d'arboriculture (Fig. 1). Ces ouvrages se trouvent le plus fréquemment en classe d'emploi 3.2 ou 4.

Sur le site d'Oléron, deux glissières de sécurité, deux clôtures et 16 piquets d'arboriculture ont été installés. Sur le site de Bordeaux, 6 platelages ont été mis en œuvre.

Des spécificités de conception ont été définies pour les platelages de manière à refléter d'une part ce qui est recommandé par le DTU (Document Technique Unifié) 51.4 « Platelages Extérieurs en Bois » en conception salubre et d'autre part de proposer un système dit insalubre afin de tester en particulier l'effet de la massivité des éléments en bois et l'effet



Fig. 1 : Photographies des différents ouvrages bois installés sur les deux sites d'expérimentation

sur l'écoulement de l'eau et des contacts direct bois/bois.

Traitements préventifs

Pour le traitement de ces ouvrages, deux produits classiquement utilisés pour la préservation des bois ont été sélectionnés en fonction des usages actuels.

Deux modalités de traitement ont été appliquées :

- Traitement à la valeur critique (VC) pour la classe d'emploi 4
- Traitement à 85% de cette VC.

Des témoins non traités sont également effectués constituant les contrôles négatifs de traitement.

Relevés des altérations biologiques

En fonction des ouvrages et de leurs particularités, différents points critiques pour le développement des termites et/ou champignons lignivores seront suivis avec des cotations prévues tous les ans.

Résultats attendus/Perspectives

A ce stade, l'ensemble des ouvrages ont été mis en place sur les deux sites d'expérimentation. Les premières cotations auront donc lieu en 2024. Au vu des caractéristiques physiques et les traitements appliqués sur les ouvrages testés, le suivi devra certainement être effectué sur une période assez longue de l'ordre de la dizaine d'années. Au vu des résultats obtenus sur d'autres projets conduit sur le terrain, les premiers résultats pourraient être observés, pour les ouvrages non traités, au bout de 4 à 5 années d'exposition.

Sur la base des relevés annuels qui seront effectués sur les différents ouvrages bois, il s'agira de pouvoir évaluer l'impact de la diminution des doses de traitement sur la durée de service attendue pour chacun de ces ouvrages. En ce qui concerne les platelages, l'impact de la salubrité de la conception sera également suivi.

Remerciements

Nous remercions France Bois Forêt et la Fédération ARBUST pour leur soutien financier. Nous adressons nos remerciements à l'ensemble des personnes ayant contribué au suivi et à la réalisation de ce projet en particulier les professionnels de la société PiveteauBois et Rondino ainsi que la Fédération Nationale du Bois.

Références

Guide FCBA (2018) Comprendre et maîtriser la durabilité du bois dans la construction

Khademibami L, Bobadilha JS (2022) Recent developments studies on wood protection research in academia: a review. *Frontiers in Forest and Global Change*

Schultz TP, Nicholas DD, Preston AF (2007) A brief review of the past, present and future wood preservation. *Pest Management Science*

Règlement (CE) n° 1907/2006 du 18/12/06 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques (Annexe XVII).

Optimisation of alcoholysis treatment in Poplar wood delignification

CHIN Yi Hien^{1,2,3}, BIWOLE Pascal^{1,4}, GRIL Joseph^{1,5}, VIAL Christophe¹,
MOUTOU PITTI Rostand^{1,6}, OULDBOUKHITINE Salah-Eddine¹, LABONNE Nicolas²,
HORIKAWA Yoshiki³

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, France.

²Dagard Company, 23600 Boussac, France.

³Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo
183-8509, Japan.

⁴MINES Paris, PSL Research University, PERSEE - Center for Processes, Renewable
Energies and Energy Systems, France.

⁵Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000 Clermont Ferrand, France.

⁶CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon.

yi_hien.chin@uca.fr

Key words: Wood nanotechnology; Delignification; Colourless wood; Poplar; Bio-based material

Context and objectives

In researching functionalization of wood, the removal of lignin is essential to produce bio-based material with high cellulose content. Various delignification methods exist, especially in the paper-making industry, where delignification takes place in the chemical pulping processes. In particular, colorless wood blocks can be produced by two-step delignification involving alcoholysis and sodium chlorite bleaching (Horikawa et al 2020). The alcoholysis procedure not only removes lignin by cleavage of the ether linkages, but also causes the hydrolysis of hemicellulose. The subsequent sodium chlorite bleaching decomposes the aromatic rings in lignin, providing the wood block with a colorless appearance (Hirano et al 2023). In this treatment, complete removal of lignin and chromophores can be achieved while preserving the hierarchical structure and the anatomic features of wood.

In this work, the optimal protocol for the alcoholysis treatment of Japanese cedar (150°C for 1 hour) was firstly applied on the French Poplar wood block. However, cracks and defibrillations were observed during the following sodium chlorite bleaching. Hence, the aim of this work was to suggest the optimal alcoholysis treatment condition for the French Poplar wood by reducing the temperature of alcoholysis treatment while lengthening the cooking duration. The wood samples which were subjected to a single step treatment (alcoholysis or sodium chlorite bleaching) were also studied for comparison purposes.

Materials and methods

Two-step delignification involving alcoholysis and sodium chlorite bleaching

Cubic wood blocks of 10 mm side length were prepared from Poplar wood with faces in the transverse, radial and tangential planes accordingly (Fig. 1a). Reagents were purchased from Wako (Japan) and Sigma-Aldrich (France). The wood blocks were impregnated in solvent consisting of ethylene glycol, water and 97 % H₂SO₄ at a mass ratio 99:0.5:0.5 under vacuum for 30 minutes before being heated in a portable reactor (TVS-N2 Type, Taiatsu Techno Corp, Japan) using oil bath. After washing, the samples were bleached according to the Wise method using a sodium chlorite solution at 70°C water bath for 8 hours. Every hour, 1 g of NaClO₂ and

0.2 ml acetic acid were added into the solution. The colorless wood samples were then washed thoroughly and freeze-dried.

Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

A PerkinElmer Frontier system (Waltham, MA, USA) with an Attenuated Total Reflection (ATR) accessory was used to obtain the FTIR spectra of the core of wood samples within the 4000-500 cm^{-1} range at 4 cm^{-1} resolution. The spectral pretreatments were done by the ATR correction functions and normalized by the top band of the fingerprint region at $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$.

Estimation of lignin and polysaccharide contents

The natural and colorless wood samples were first subjected to acid hydrolysis in a two-stage treatment (72 % sulfuric acid at 30°C for 1 hour followed by 4 % sulfuric acid at 121°C for 1 hour). The acid-insoluble residue, mainly represented by Klason lignin, was dried and weighed as the lignin content. The monosaccharide concentration was measured by high-performance liquid chromatography (HPLC) equipped with a separation column (Asahipak NH2P-50 4E, Showa Denko K.K., Tokyo, Japan), a differential refractive index detector and an autosampler (Prominence, Shimadzu, Kyoto, Japan). The polysaccharide content was calculated from the corresponding monosaccharide concentration with the anhydrous correction factors of 0.90 for glucose, mannose and galactose, 0.88 for xylose and arabinose.

X-ray diffraction analysis

X-ray diffractograms were obtained in the reflection mode using an automated multipurpose X-ray diffractometer (SmartLab, Rigaku, Tokyo, Japan) at 40 kV and 30 mA. The relative crystallinity index (RCI) and full width at half maximum (FWHM) at a peak of (200) were calculated from the diffractogram by Pseudo-Voigt function fitting.

Pore volume fraction

The pore volume fraction, V_p was estimated with the dry wood sample density, ρ_{sample} and the density of dry cell wall, $\rho_{cell\ wall}$ which is about 1.5 g/cm^3 , with the following equation:

$$\text{Pore volume fraction (\%)} = \left(1 - \frac{\rho_{sample}}{\rho_{cell\ wall}} \right) \times 100\%$$

Results and discussion

Influence of lignin and hemicellulose removal

After the two-step delignification involving alcoholysis and sodium chlorite bleaching, the Poplar wood block decolorized and became free from lignin and hemicellulose. Both steps were essential to remove the non-cellulosic components, as shown in Fig. 1b,c, the brownish color retained due to the remaining light-absorbing chromophore structures in lignin. In the case of alcoholysis at 150°C for 1 hour followed by sodium chlorite bleaching, cracks appeared after the final washing step along the radial direction where the ray cells located (Fig. 1f). For the samples subjected to alcoholysis at 100°C and 120°C for 1 hour, no cracks were observed (Fig. 1d,e). In all cases, the 3-dimensional wooden architecture was preserved. It was also observed that the sample swells more in the tangential direction after alcoholysis treatment compared to the radial direction. After the 2-step treatment and freeze-drying, the dimension variation in tangential direction was also more significant than that in longitudinal and radial directions.

After the two-step treatment, the spectral bands at 1508 cm^{-1} flattened, indicating the absence of lignin in the cores of wood blocks. As for the band at 1730 cm^{-1} assigned to acetylated hemicellulose, only alcoholysis at 150°C successfully removed hemicellulose in 1 hour (Fig.

2). The chemical components analysis carried out showed that the colorless Poplar wood block (treated with alcoholysis at 150°C for 1 hour followed by sodium chlorite bleaching) has nearly all of the acid-insoluble content removed and is mainly composed of cellulose (Fig. 3).

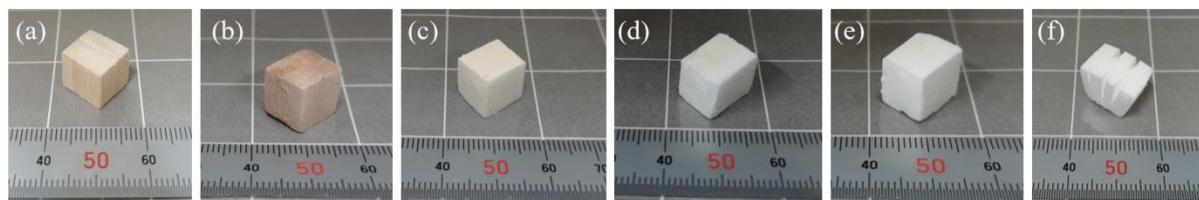


Fig. 1: Poplar wood blocks: (a) without treatment; (b) after alcoholysis at 150°C for 1 hour; (c) after NaClO₂ bleaching; (d) after alcoholysis at 100°C for 1 hour and NaClO₂ bleaching; (e) after alcoholysis at 120°C for 1 hour and NaClO₂ bleaching; (f) after alcoholysis at 150°C for 1 hour and NaClO₂ bleaching

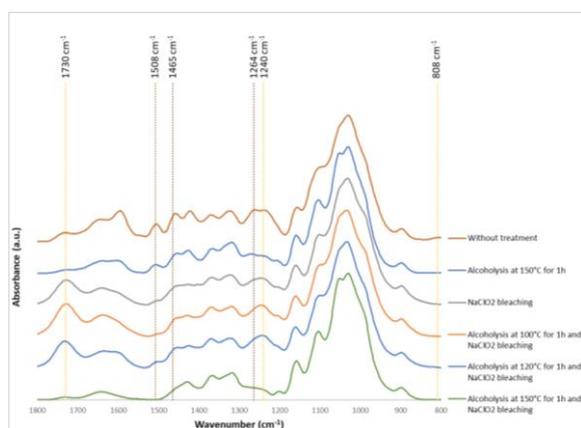


Fig. 2: FTIR spectra for the cores of Poplar wood blocks under different treatment conditions

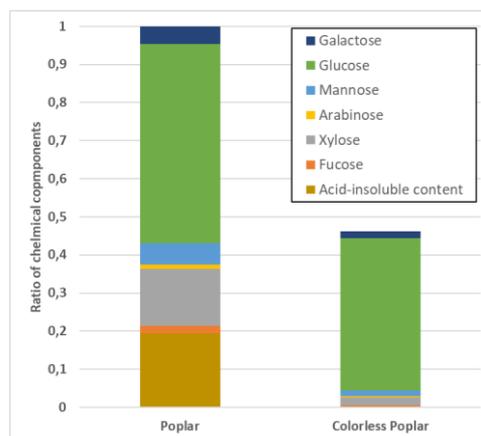


Fig. 3 : Ratio of chemical components in Poplar wood before and after treatment

Similar patterns were observed in the wide-angle X-ray diffractograms, indicating that the natural cellulose crystalline structure was maintained. The higher crystalline index and lower full width at half maximum of (200) of colorless Poplar calculated (Tab. 1) reflects the higher relative crystallinity due to the improvement of cellulose microfibril orientation after treatment (Horikawa et al. 2020).

Tab. 1 : Crystalline index and full width at half maximum of untreated and colorless Poplar

| | Crystalline index | Full width at half maximum of (200)(°) |
|------------------|-------------------|--|
| Untreated Poplar | 0.759 | 2.98 |
| Colorless Poplar | 0.829 | 2.49 |

Influence of alcoholysis temperature and duration

According to Fig. 4, an alcoholysis treatment at higher temperature or longer duration causes higher mass loss due to more substance removal. Consequently, the density reduces and the pore volume fraction increases (Fig. 5 and Fig. 6). It seemed that alcoholysis treatment at 120°C for more than 3 hours is required before sodium chlorite bleaching to achieve sufficient delignification efficiency, while an alcoholysis treatment of more than 5 hours is needed at 100°C. However, cracks were observed for most samples under these conditions, except for the samples treated for more than 5 hours at 120°C for which, surprisingly, no cracks were present.

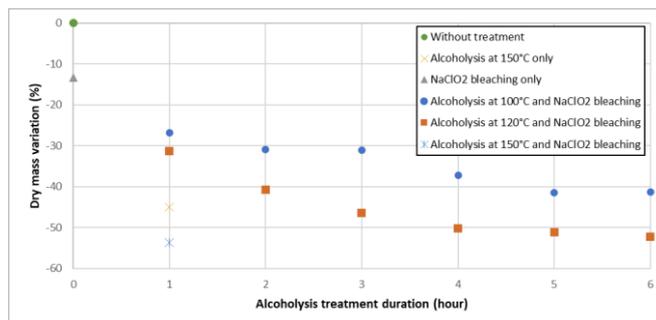


Fig. 4: Dry mass variation of poplar wood under different treatment conditions

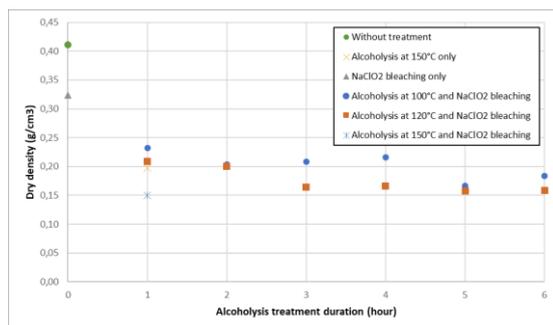


Fig. 5 : Dry density of Poplar wood under different treatment conditions

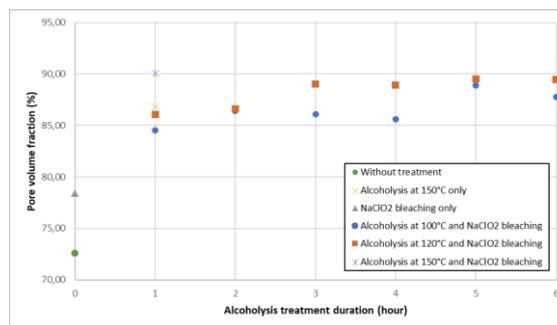


Fig. 6 : Pore volume fraction of Poplar wood under different treatment conditions

Conclusion and perspectives

The removal of lignin and hemicelluloses from Poplar wood reduces its density close to that of balsa wood. Such low density represents low thermal conductivity and shows potential for utilization as bio-based insulation material. However, the mechanical properties still need to be tested against higher density requirements, depending on the usage, which may be attained by reducing the level of delignification. In addition, the surface of all samples after the two-step treatment decolorized, indicating the importance of solvent accessibility and the possibility to delignify wood veneers of a few millimeters homogeneously by alcoholysis at 100°C for 1 hour, followed by sodium chlorite bleaching. For scale-up production, alternative drying methods and environmentally friendly bleaching reagents must be investigated.

Acknowledgements

This work is supported by the French National Research Agency (ANR) and the company Dagard, under « France Relance » plan. The summer research visit was co-funded by the I-Site project CAP 20-25 and Tokyo University of Agriculture and Technology. The authors wish to thank the members of the Laboratory of Biomass Structural Functionality (T.Kurei, X.Wei, Y.Yasuda, S.Sakai, R.Suzuki, A.Yamanaka) for the guidance of experimental instruments.

References

- Hirano S., Kurei T., Nakaba S., Funada R., Horikawa, Y. (2023). Elucidation of alcoholysis for the preparation of lignin-free wood sections from *Cryptomeria japonica*. *Cellulose*, 30(10), 6589–6600.
- Horikawa Y., Tsushima R., Noguchi K., Nakaba S., Funada R. (2020). Development of colorless wood via two-step delignification involving alcoholysis and bleaching with maintaining natural hierarchical structure. *Journal of Wood Science*, 66(1), 37.

Liens entre stabilité dimensionnelle du bois et tempérament vis-à-vis de la lumière de feuillus tropicaux du Gabon

NKENE MEZUI Estelle^{1, 2, 3}, BRANCHERIAU Loïc², IKOGOU Samuel³,
MOUTOU PITTI Rostand^{4, 5}

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

²Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Unité de Recherche BioWooEB, 34398 Montpellier, France

³Laboratoire de Recherche et Valorisation du matériau Bois (LaReVaBois), 3960 Libreville, Gabon

⁴Ecole Polytechnique de Masuku (EPM-USTM), Franceville, Gabon

⁵CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

esthernkenemezui@gmail.com

Mots clés : stabilité dimensionnelle ; tempérament écologique ; feuillus tropicaux ; retraits ; anisotropie

Contexte et objectifs

Le Gabon est un pays d'Afrique centrale qui renferme de vastes zones forestières représentant 80% de son territoire (Ikogou et al. 2016) avec plus de 600 espèces arborescentes (Arrêté 2004) d'une diversité qui gagnerait à être valorisée. Dans ces forêts, les espèces d'arbres ont différents degrés de tolérance de l'ombre. Il est ainsi possible de les regrouper en différentes classes comme les espèces d'arbres héliophiles et pionnières, à l'inverse, des espèces tolérantes à l'ombre ou bien encore des tempéraments intermédiaires avec des espèces dites hémitolérantes. Malheureusement, on note une absence importante d'informations scientifiques sur les caractéristiques techniques du bois de bon nombre d'entre elles telles que leur stabilité dimensionnelle qui est une propriété importante pour leur valorisation. La stabilité dimensionnelle renvoie à la faculté pour le bois de conserver ses dimensions lorsqu'il est exposé à des variations de température et/ou d'humidité. Le bois étant un matériau anisotrope, on considère qu'une essence est stable lorsque ses variations dimensionnelles sont très faibles, c'est-à-dire lorsque l'anisotropie qui est le rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial est proche de 1. L'objectif de cette étude est de mettre en relation la stabilité dimensionnelle du bois de 25 espèces de feuillus tropicaux et leur tempérament vis-à-vis de la lumière.

Matériel et méthodes

L'étude porte sur 25 espèces d'arbres feuillus tropicaux du Gabon prélevés sous forme de plateaux au parc à bois de la maison de la technologique du CIRAD à Montpellier. Ceux-ci ont été répartis en trois tempéraments vis-à-vis de la lumière distincts (Tab. 1). Parmi les 25 espèces, on compte 5 espèces pionnières (P), 10 espèces hémitolérantes (HT) et 10 espèces tolérantes à l'ombre (TO). Les espèces pionnières représentent des espèces qui ne peuvent en aucun cas tolérer l'ombre quel que soit le stade de développement (Swaine et Whitmore 1988). Les espèces hémitolérantes et tolérantes peuvent tolérer l'ombre tout ou une partie de leur vie. Les tempéraments des espèces sont tirés de Meunier et al. (2015), de Doucet (2003), de Bénédet et al. (2019) et de Prota4u (référence en ligne).

Tab. 1 : Espèces d'arbres étudiées et tempéraments écologiques associés

| Espèces | Tempéraments écologiques |
|--|--------------------------|
| <i>Anthocleista nobilis</i> G.Don | P |
| <i>Cleistopholis glauca</i> Pierre | P |
| <i>Croton oligandrus</i> Pierre | P |
| <i>Discoglyprena caloneura</i> Prain | P |
| <i>Fillaeopsis discophora</i> Harms | P |
| <i>Baillonella toxisperma</i> Pierre | HT |
| <i>Celtis tessmannii</i> Rendle | HT |
| <i>Dacryodes buettneri</i> H.J.Lam | HT |
| <i>Dacryodes normandii</i> Aubrev. et Pellegr. | HT |
| <i>Gilbertiodendron brachystegioides</i> J.Leon. | HT |
| <i>Gossweilerodendron balsamiferum</i> Harms | HT |
| <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre | HT |
| <i>Parkia bicolor</i> A.Chev | HT |
| <i>Sacoglottis gabonensis</i> Urb. | HT |
| <i>Scyphocephalum mannii</i> Warb. | HT |
| <i>Beilschmiedia</i> sp | TO |
| <i>Brachystegia laurentii</i> Louis | TO |
| <i>Dacryodes igaganga</i> Aubrev. et Pellegr. | TO |
| <i>Daniellia soyauxii</i> Rolfe | TO |
| <i>Desbordesia glaucescens</i> Van Tiegh. | TO |
| <i>Dialium dinklagei</i> Harms | TO |
| <i>Dialium pachyphyllum</i> Harms | TO |
| <i>Erismadelphus exsul</i> Mildbr. | TO |
| <i>Poga oleosa</i> Pierre | TO |
| <i>Scytopetalum klaineanum</i> Pierre | TO |

P : pionnier ; HT : héli-tolérant ; TO : tolérant à l'ombre

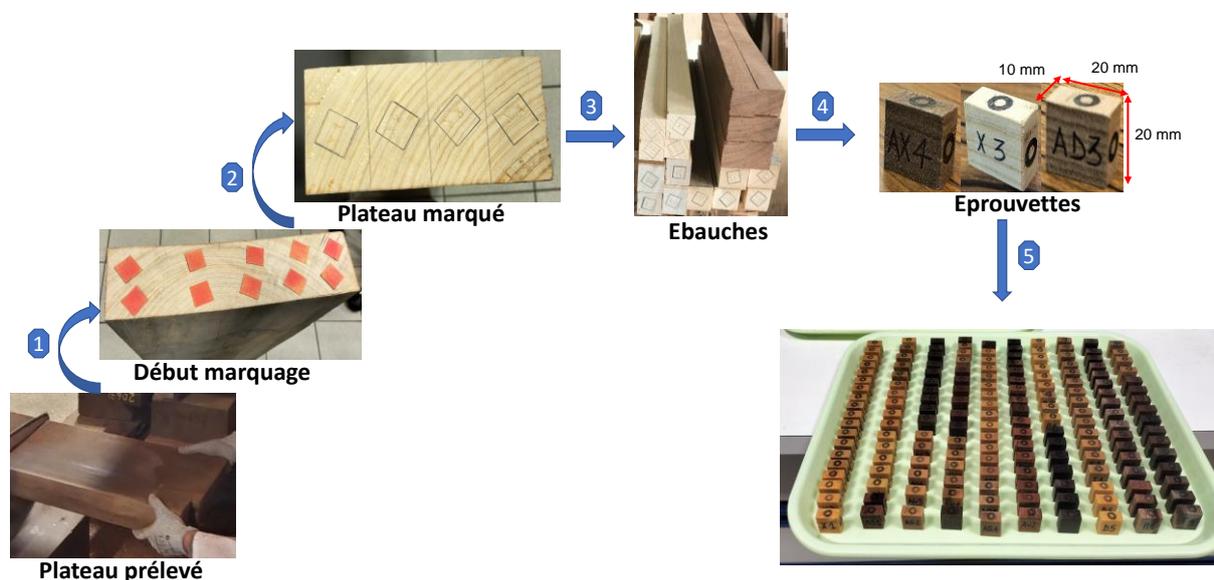


Fig. 1 : Préparation des échantillons d'essai

Les échantillons (Fig. 1) ont par la suite été immergés dans des bocaux en verre contenant de l'eau distillée (chaque espèce dans un bocal). Afin de permettre l'immersion des échantillons, un poids est introduit dans chaque bocal. Un trou est réalisé sur les couvercles des bocaux afin de permettre une bonne circulation de l'air. Les bocaux sont ensuite introduits dans un autoclave (Fig. 2) et des cycles de mise sous vide puis à pression atmosphérique sont réalisés pendant 48 heures maximum en fonction de l'espèce. Au terme de ce temps de saturation, les masses et les

dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes saturées ont été mesurées. Par la suite, des paliers de stabilisation des éprouvettes (palier 1 : 18 % ; palier 2 : 12 % ; palier 3 : 6% et palier 4 : 0 % à 103°C pendant 48 heures) ont été effectués en enceinte climatique tout en mesurant les différentes variations des dimensions des éprouvettes.

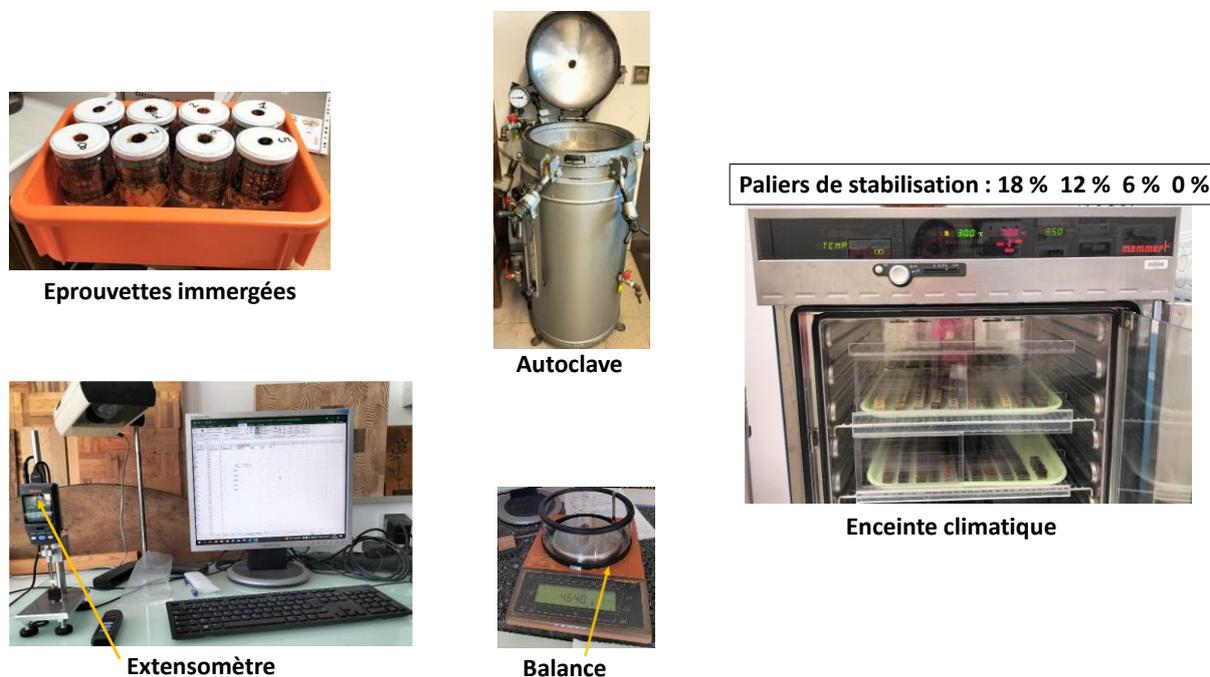


Fig. 2 : Conditionnement et mesures des dimensions et des masses des éprouvettes

Au terme de ces différentes mesures, les propriétés étudiées ont été déterminées suivant les équations suivantes :

$$RT\% = RR\% = \frac{L_s - L_0}{L_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\frac{RT}{RR} = \text{Anisotropie des retraits} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

où L_s et L_0 sont les dimensions radiale et tangentielle des éprouvettes respectivement aux étapes saturé et anhydre, ρ la densité du bois calculée sur des éprouvettes de détermination du module d'élasticité ($20 \times 20 \times 370$ mm) avec m la masse de l'éprouvette et v le volume de l'éprouvette qui est assimilable à un parallélépipède rectangle.

Les PSF quant à eux correspondent à l'ordonnée à l'origine des courbes des taux d'humidité et celles des variations surfaciques dans le plan RT. La Fig. 3 montre trois exemples de détermination des PSF de trois éprouvettes.

Par ailleurs, grâce à une analyse de variance à 1 facteur (ANOVA) réalisée sous RStudio, nous avons pu identifier les propriétés dépendantes du tempérament écologique de l'espèce. Le test post-hoc de Tukey a permis de mettre en évidence les paires de groupes écologiques chez lesquels il y avait des différences statistiques.

Résultats

Les liaisons linéaires entre les propriétés étudiées ont été évaluées grâce à une analyse de corrélation sous le logiciel RStudio pour identifier les variables qui évoluent ensemble, celles

qui évoluent en sens opposé et celles qui ne dépendent d'aucune autre propriété. La Fig. 4 présente ces liens.

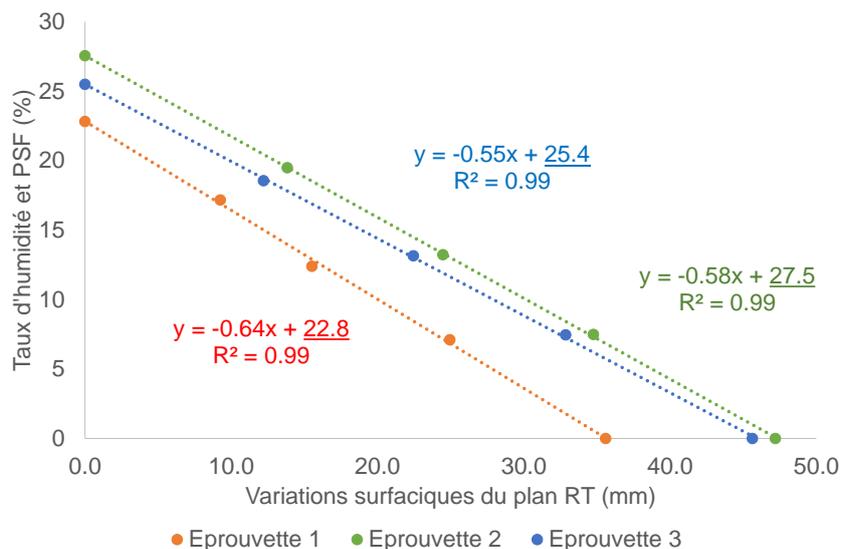


Fig. 3 : Détermination du PSF par calcul de l'ordonnée à l'origine.

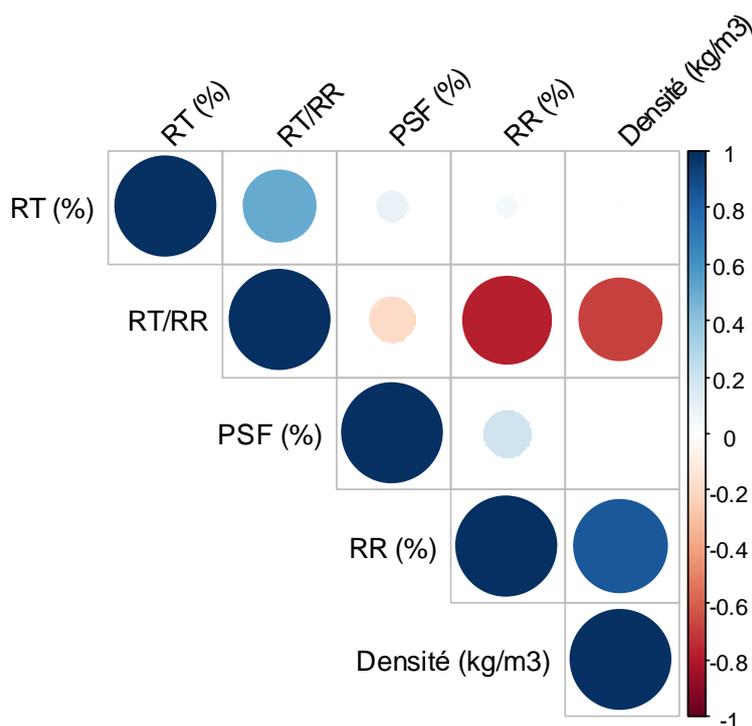


Fig. 4 : Corrélogramme des propriétés étudiées : les corrélations positives et négatives sont respectivement en bleu et en rouge et l'intensité de la corrélation est indiquée par la taille des cercles.

Globalement on observe que l'anisotropie des retraits (RT/RR) est corrélée négativement à toutes les autres propriétés et surtout au retrait radial (RR). Seul le retrait radial est corrélé positivement à la densité du bois et cette corrélation est forte. Il est en même temps faiblement corrélé au PSF. Le retrait tangentiel est corrélé positivement avec l'anisotropie des retraits (forte corrélation), le PSF et le retrait radial (corrélations faibles). Ces résultats rejoignent les observations de Masseran and Mariaux (1985) et de Messaoudène et al. (2018).

La Fig. 5 présente les différences statistiques entre les groupes de tempéraments obtenus grâce au test post-hoc de Tukey. Toutes les autres propriétés à l'exception du PSF se sont avérées être

liées au tempérament vis-à-vis de la lumière de l'espèce. Sur la Fig. 5, pour toutes les propriétés on observe que les espèces héli-tolérantes (HT en rouge) et les espèces tolérantes à l'ombre (TO en bleu) sont statistiquement identiques. Par ailleurs, les espèces pionnières (P en vert) ont une densité du bois (Fig. 5iv) et un retrait radial (Fig. 5i) plus faible que ceux des espèces des deux autres groupes. Par contre, leur retrait tangentiel est plus élevé (Fig. 5ii). Par ailleurs, les espèces héli-tolérantes et tolérantes à l'ombre apparaissent moins instables dimensionnellement que les espèces pionnières pour lesquelles l'anisotropie est très prononcée (Fig. 5iii).

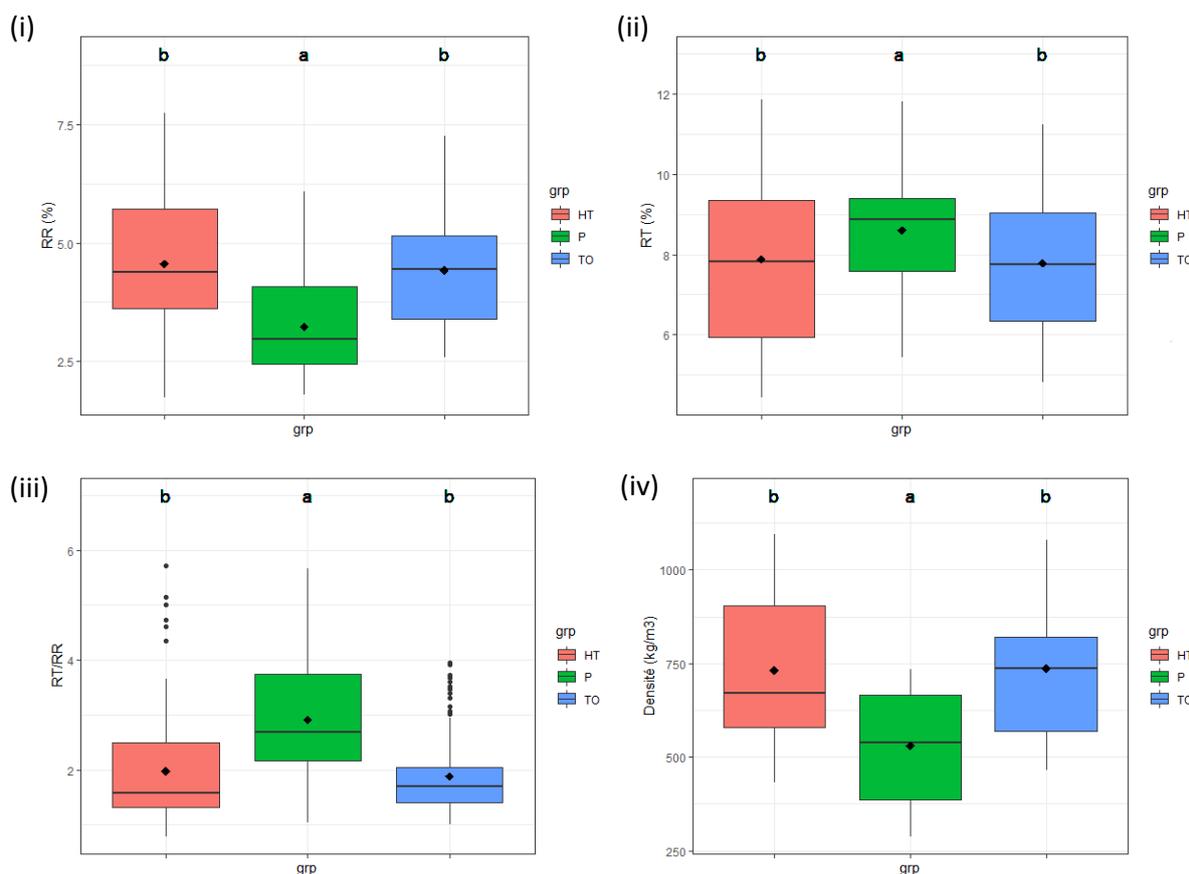


Fig. 5 : Distributions des propriétés statistiquement significatives en fonction du tempérament écologique. a et b : lettres indiquant des différences statistiques ou non. Lorsque deux distributions ont la même lettre, cela signifie qu'elles ne sont pas statistiquement différentes.

Conclusion et perspectives

Pour conclure, nous pouvons retenir que le tempérament vis-à-vis de la lumière des espèces d'arbres étudiées est reliée à la stabilité dimensionnelle du bois de ces dernières. Les espèces héli-tolérantes et tolérantes à l'ombre ont une densité de bois et un retrait radial plus élevés, sont moins instables et ont un retrait tangentiel plus faible comparées aux espèces pionnières. Dans une étude future, nous tenterons de comprendre quels sont les traits anatomiques responsables de ces différences de comportement entre les tempéraments écologiques et aussi ce qui peut expliquer que les trois groupes de notre étude présentent une anisotropie élevée (> 1).

Références

Ministre de l'Economie Forestière, des Eaux, de la Pêche, chargé de l'Environnement et de la Protection de la Nature (2004) Arrêté fixant la composition des groupes d'essences exploitables (En application de l'Article 31 de la Loi 016/01).

Bénédet F., Doucet J.L., Fayolle A., Gillet J.F., Gourlet-Fleury S., Vincke D. (2019) CoForTraits, African plant traits information database, doi:10.18167/DVN1/Y2BIZK, CIRAD Dataverse, V1. [accessed on 9 June and 13 September 2022].

Doucet J.L. (2003) L'alliance délicate de la gestion forestière et de la biodiversité dans les forêts du centre du Gabon. Thèse de doctorat, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.

Ikogou S., PambouNziengui C.F., Moutou Pitti R., EkomyAngo S. (2016) Experimental study of tropical wood under cyclic compressive loading for sustainable constructions. World Conference of Timber Engineering (WCTE), August 2225, Vienna, Austria.

Masseran C., Mariaux A. (1985) Anisotropie de retrait et structure du bois. Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. BOIS & FORETS DES TROPIQUES, 209, 35-47. <https://doi.org/10.19182/bft1985.209.a19537>

Messaoudène M., Tafer M., Loukkas A., Marchal R. (2008) Propriétés physiques du bois de chêne zéen de la forêt des Aït Ghobri (Algérie). BOIS & FORETS DES TROPIQUES, 298, 37-48. <https://doi.org/10.19182/bft2008.298.a20364>

Meunier Q., Moumbogou C., Doucet J.L. (2015) The useful trees from Gabon (in French). Gembloux Agronomic Presses.

Prota4u Database. <https://prota.prota4u.org/>

Swaine M.D., Whitmore T.C. (1988) On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. Vegetatio, 75(1), 81-86. <https://doi.org/10.1007/BF00044629>

Valorisation de biomasses résiduelles de menuiserie en matériau composite

LE COURBE Arnaud^{1,2}, CARAYON Lionel¹, CANDELIER Kévin^{3,4},
VIRETTO Amandine^{3,4}

¹Menuiserie CARAYON, Béziers, France

²Master Sciences du bois, Faculté des sciences, Univ Montpellier, Montpellier, France

³CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.

⁴BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

Lecourbea@gmail.com

Mots-clés : Co-produits ; Formulations biosourcées ; Matériaux composites ; Menuiseries intérieures ; Panneaux de fibres ; Propriétés physico-chimiques.

Contexte et objectifs

CARAYON Menuiserie (Béziers, France) est une entreprise de menuiserie intérieure et extérieure bois. Sa production est encore en pleine croissance, et engendre une augmentation du surplus de connexes tels que les sciures et les copeaux de bois. Le projet a pour but de valoriser cette biomasse résiduelle, en développant un matériau composite à partir des connexes de bois et d'une résine biosourcée. Ce nouveau matériau sera destiné à la fabrication de menuiseries innovantes, développées au sein du FabLab (Laboratoire de R&D) de l'entreprise et en collaboration avec BioWooEB (Cirad), et permettra ainsi d'élargir les activités et la gamme de produits de la société. En plus de ses avantages économiques, ce projet s'inscrit dans une démarche intégrée permettant à l'entreprise de réduire ses émissions de CO₂ et autres gaz à effets de serre, ainsi que de réduire la pression de l'exploitation forestière sur les forêts en limitant la consommation de bois massif par substitution grâce à des matériaux composites issus de ressources résiduelles. L'intégration de ces nouveaux matériaux composites dans la chaîne de production de l'entreprise reste compétitive et cohérente avec le contexte socio-économique et propose une réponse intéressante aux enjeux environnementaux actuels.

Matériels et méthodes

Caractérisations des biomasses

Dans un premier temps, les biomasses résiduelles destinées à la conception de ces nouveaux matériaux composites sont caractérisées du point de vue de leur composition chimiques (cellulose, hémicelluloses, lignine, extractibles et minéraux), de leur densité et de leur morphologie (taille et forme). Cette première étape est essentielle afin d'optimiser la formulation et le procédé de fabrication des matériaux composites développés et de pouvoir en anticiper les propriétés technologiques.

Formulations

Les formulations sont basées sur la valorisation des connexes de menuiserie [copeaux et sciures de bois, ainsi qu'une biomasse locale (résidus agro-alimentaire)], et une matrice polymérique commerciale. L'utilisation d'une résine d'origine biosourcée permettra de développer des matériaux 100% renouvelables. Le mélange est réalisé mécaniquement afin d'obtenir une mixture la plus homogène possible. La mise en forme est réalisée avec une presse hydraulique chauffante (MIB-100T, MIB France) en utilisant un système de moule/contre-moule. La densité des composites est contrôlée par la masse du mélange introduite dans le moule. De plus,

différents paramètres sont évalués comme le ratio fibres/matrice, le ratio entre les différents types de fibres ligneuses, la température et la durée de mise en œuvre.

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. Pour ce faire, les différentes modalités de composites développés (en fonction des paramètres cités ci-dessus) sont caractérisés du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques (Densité, Porosité et Gonflement), mécaniques (Flexion, Compression, Impact et Arrachement) (NF EN 310 1993), thermiques (ATG/DSC et conductivité), de leur comportement au feu (Cône calorimètre, LOI et UL94) et de leur durabilité vis-à-vis des champignons (1 pourriture blanche et 1 pourriture brune) (EN 350, 2016) et des termites (*Reticulitermes flavipes*) (EN 117 2013). L'ensemble de ces propriétés des différents matériaux seront ensuite comparés à celles et d'échantillons de menuiseries en bois lamellé-collé fabriqués par la menuiserie CARAYON.

Premiers résultats et discussions

Différentes modalités de composites ont ainsi été réalisés, avec différents rapports Fibres/Matrice, afin d'évaluer l'influence de ces ratios sur les propriétés des matériaux. Après leur mise en forme, la majorité des échantillons possèdent un aspect visuel de surface solide et lisse (Fig. 1, 2).



Fig. 1 : Aspect visuel du composite 80 % sciures – 20 % résine (WM)



Fig. 2 : Aspect visuel du composite 26.6 % copeaux – 26.6 % sciures -26.6 % résidus agroalimentaires - 20 % résine (WM)

Toutefois, certaines modalités de fabrication n'ont pas abouti à un matériau compact, et présentaient un aspect plus friable ou se sont même complètement fracturées lors du démoulage. Par ailleurs, les formulations contenant un pourcentage élevé (entre 90 et 60 % wt.) de résidus agroalimentaires ne permettent pas d'obtenir des matériaux avec tenue mécanique acceptable.

Des premiers essais mécaniques, de tests en flexion 3 points (NF EN 310 1993) ont été réalisées sur les différents composites fabriqués et sur des échantillons de bois lamellé-collé, utilisés comme référence. A ce stade, la résistance à la rupture des composites n'est pas encore satisfaisante (avec une valeur moyenne de 3 MPa) et les formulations doivent être optimisés.

Conclusions et perspectives

De nombreuses formulations ont été réalisées, ce qui permet de mettre en avant les paramètres les plus importants à optimiser en vue de conférer au matériaux composites les propriétés requises. Les premiers essais mécaniques réalisés sur les composites sont encourageants, même si leurs propriétés ne sont pas encore équivalentes à celles des menuiseries en bois lamellé-collé. De nombreuses pistes d'étude sont envisagées pour s'en rapprocher au mieux ; comme de chercher à densifier nos matériaux, de modifier les ratios Fibres/Matrice, voir même augmenter le taux de résine qui à l'heure actuelle est faible (10-20 wt%).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Programme d'Excellence I-site montpellierain pour l'attribution du financement « Companies on Campus » pour le projet RECOMPOSE, ainsi que le laboratoire d'excellence de l'Université de Montpellier, LabEx NUMEV pour son soutien financier au master sciences du bois, permettant aux étudiants de participer aux journées annuelles 2023 du GDR Sciences du Bois.

Références

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. European committee for standardization, Brussels, Belgium, pp. 71.

EN 117 (2013) Wood preservatives – Determination of toxic values against Reticulitermes species (European termites) (Laboratory method). European committee for standardization, Brussels, Belgium, pp. 26.

NF EN 310 (1993) Panneaux à base de bois – Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion.

La plateforme SILVATECH, infrastructure scientifique collective

RUELLE Julien¹, ANGELI Nicolas¹, ROSE Christophe¹, GERARD Bastien¹

¹Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva
julien.ruelle@inrae.fr

Mots clés : Isotopie ; Chimie ; Microscopie ; Tomographie ; Micro-densitométrie ; Diffractométrie 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 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, et 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 pour le pôle Isotopie-Chimie

| Type de service | Technologie | Méthodes/paramètres acquis |
|---|---|--|
| Isotopie (Naturel/Enrichi) | Pyr-EA-IRMS (solide) | $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$ |
| | Pyr-EA-IRMS ou laser (liquide) | δD , $\delta^{18}\text{O}$ |
| | 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) | Sucres solubles |
| | Spectrophotométrie – colorimétrie enzymatique (molécules) | Sucres solubles, amidons |

Tab. 2 : Services proposés pour le pôle Imagerie-Mesures Multi-Modales

| 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 |
| | AxioImager M2 | |
| | MacroZoom | |
| 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 | Débites 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

Projet FIXPIN : Mise en place d'un procédé thermique type industriel de contrôle de l'exsudation de la résine de Pin maritime (*Pinus pinaster*)

MEHATS Jérémy¹, SANCHEZ Alexandre¹, CABARET Thomas², CASTETS Laurent³, ROBLES Eduardo¹, CHARRIER Bertrand¹

¹IPREM – Université de Pau et des Pays de l'Adour, E25 UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan, France

²Protosphère, 4 petite rue des landes, 40000 Mont-de-Marsan

³Gascogne Bois, Rte de Cap de Pin, 40210 Escource

jmehats@univ-pau.fr

Mots clés : Pin maritime, térébenthine, colophane, exsudation, chromatographie gazeuse, spectrométrie de masse.

Introduction

La filière Bois est l'un des acteurs majeurs de la Nouvelle-Aquitaine de par ses 28 000 emplois directs et son chiffre d'affaires (CA) s'élevant à 2,5 milliards d'euros. En raison d'une concurrence accrue sur ses marchés depuis les années 90, le CA des produits issus du rabotage industriel du pin maritime (*Pinus pinaster*) décroît depuis une vingtaine d'année entraînant une perte de 50 % des volumes produits. Pour pallier à cette baisse, les marchés des bardages et des bois utilisés en extérieur sont apparus comme une solution attrayante. Cependant, le pin maritime peine à s'insérer dans ces secteurs en raison de divers facteurs, notamment les coûts de transformation élevés, le déclassement assez important des lames, etc.

A ceci, s'ajoute également l'exsudation de la résine qui est un phénomène naturel apparaissant dès lors que la température du bois mis en œuvre s'élève, comme lorsqu'il est exposé au soleil. Ce phénomène est d'autant plus répandu si les lames de bois utilisées possèdent un haut taux de duramen, naturellement riche en résine et extractibles, ou qui comportent également un nombre élevé de poches de résine ou de nœuds. Ce phénomène d'exsudation va souvent engendrer des défauts esthétiques sur le bois en raison des coulures de résine mais va également fragiliser les couches de produits finitions appliquées au matériaux, tels que les vernis ou les peintures. L'exsudation du bois de pin maritime représente donc un frein considérable à son usage en extérieur.

Le développement d'une stratégie de contrôle de cette exsudation a vu le jour au cours de la thèse de T. Cabaret entre 2015 et 2018, dans le cadre du projet Fixpin (Cabaret 2018a). L'objectif de ces travaux était de développer une méthode de contrôle de l'exsudation par le biais de séchages/traitements thermiques. Il a été montré que dans les coulures de résines sur du bois en extérieur, un fort taux de térébenthine était retrouvé. Cette dernière se présente normalement sous la forme d'un liquide limpide et est essentiellement composée de molécules volatiles : principalement des monoterpènes (α -pinène, β -pinène, etc.). Elle agit au sein de l'arbre comme le solvant du second constituant de la résine, la colophane qui, lorsqu'elle est isolée, apparaît sous la forme d'un solide friable et collant de couleur jaune pâle. Cette matière est majoritairement constituée de composés terpéniques de masse molaire plus élevée, comme les acides résiniques (acide abiétique, acide pimarique, etc.). Des échantillons de résine ont été soumis à des traitements réalisés à différentes températures : basse (60 °C) et haute (90 °C), puis laissés à température ambiante pendant quelques mois. Les échantillons chauffés à 90 °C présentent un point de ramollissement autour de 25 °C et un taux de térébenthine élevé tandis

que ceux chauffés à 60 °C possèdent un point de ramollissement supérieur à 60 °C et un taux de térébenthine plus faible. Dans les échantillons chauffés à 90 °C, la colophane agit comme un gel qui piège la térébenthine et l'empêche de s'évaporer (Cabaret et al 2018b). La différence de point de ramollissement entre les 2 échantillons chauffés est donc liée au taux de térébenthine résiduel présent dans la résine et il est donc nécessaire de l'évaporer afin de contrôler voire éradiquer le phénomène d'exsudation. Des planches de bois de pin maritime ont été soumises à des séchages à différentes températures (60, 90, 120 et 150 °C) puis à un test d'exsudation. Les deux premières températures ont été choisies car elles correspondent à celles couramment utilisées dans les séchoirs des scieries, les deux suivantes plus élevées permettent de se rapprocher de la température d'ébullition de la térébenthine (comprise entre 150 et 180 °C, INRS 2011). Les résultats ont montré que les planches ayant été séchées à 150 °C n'exsudaient pas pendant le test d'exsudation. De plus, elles présentent un taux de térébenthine de $5,0 \pm 0,3$ % contre $50 \pm 1,5$ % pour les planches avant traitement et $38,9 \pm 2,0$ %, $26,1 \pm 7,3$ %, $19,9 \pm 4,7$ % pour les planches traitées à 60, 90 et 120 °C respectivement (Cabaret et al 2019a, Cabaret et al 2019b).

Fort de ces résultats très prometteurs à l'échelle laboratoire, le projet Fixpin est né en 2019 avec pour objectif d'aller plus loin dans le développement d'une méthode de contrôle de l'exsudation de la résine, applicable à une échelle industrielle. Dans le cadre de ce projet, un travail préliminaire et conséquent de quantification par spectroscopie proche infrarouge (SPIR ou NIRS) de résine et d'essence de térébenthine au cœur de planches de pin maritime a été réalisé par Rubini et al (2021). Ces travaux ont permis d'établir un profil de quantité de résine et d'essence de térébenthine en fonction de la zone étudiée de la planche.

Le taux de térébenthine jouant un rôle crucial dans le phénomène d'exsudation, le procédé de séchage/traitement thermique mis en jeu doit pouvoir réunir les conditions nécessaires pour aboutir à son évaporation. Cela implique de pouvoir moduler la température mais également de jouer sur la pression qui, lorsqu'elle est réduite, permet d'abaisser le point d'ébullition de la térébenthine. Quatre campagnes d'essai de séchage à grande échelle ont été réalisées entre 2021 et 2023 selon 4 procédés : Air Chaud Climatisé (ACC, correspondant à un séchage industriel en scierie), séchage sous vide (SSV), traitement thermique haute température (THT) et brûlage du bois.

Le présent poster montre les résultats des différents traitement réalisés sur la composition chimique de la résine restante dans le bois et leurs effets sur le phénomène d'exsudation.

Matériel et méthodes

Thermotraitement (THT)

Le bois a été fourni par la société Gascogne Bois en mars 2023 : 6 palettes de bois sur liteaux de 2400*150*27 mm, soient 600 planches. Les planches ont été sélectionnées selon leur fortes teneurs en duramen, en poches de résine et en nœuds. Les planches ont été préalablement séchées selon la méthode pratiquée par Gascogne Bois, puis acheminées pour le thermotraitement chez la société Aprobois SCOP située à Carhaix-Plouguer (Finistère, Bretagne). Trois températures ont été étudiées : 140, 175 et 210 °C, appliquées dans un four type WDE-Maspell, sous vide garantissant ainsi l'inertage du procédé. Après traitement, les palettes ont été réacheminées vers la société Gascogne Bois St Symphorien (Gironde), puis un dépilage a été réalisé le 14 avril 2023 (étude macroscopique des planches sur la ligne de production et sélection des planches). 50 planches ont été collectées pour le THT à 210 °C, et 45 planches pour le THT à 175 °C et le THT à 140 °C.

Séchage sous vide (SSV)

160 planches en 2500*200*27 mm de bois vert ont été fournies le 30 mars 2023 par la société Labadie puis acheminées vers le séchoir (type WDE-Maspell) de la scierie Lesbats située à St-Perdon (Landes). Un séchage sous vide (température comprise entre 70 et 80 °C) a été réalisé, puis les planches ont été collectées le 17 mai 2023 après étude macroscopique.

Brûlage du bois (BB)

La société NDB n'a pas souhaité communiquer sur les caractéristiques et paramètres techniques de son traitement de surface par brûlage puis finition huilée.

Exsudation des planches traitées

Avant toutes analyses complémentaires, chaque planche collectée a été découpée afin de pouvoir passer le test d'exsudation. Un morceau de dimension 600*150*27 a ainsi été obtenu pour chaque planche étudiée. Ces échantillons ont été placés dans un dispositif appelé « exsudeuse », créé par T. Cabaret au cours de sa thèse en 2018 (Cabaret 2018a) (Fig. 1).



Fig. 1 : Dispositif d'exsudation ou « Exsudeuse »

Cet appareillage permet d'élever la température des planches à l'aide de 10 ampoules infrarouge de 250 W. Ces dernières sont fixées sur une paroi en bois sur pied placée en face d'un support sur lequel peuvent être posées 12 planches à étudier. En changeant la distance entre les ampoules et le support, la température en surface et à cœur des planches peut ainsi être modulée.

Carottage et broyage des échantillons à étudier

Afin d'analyser l'influence des séchages et des traitements thermiques appliqués sur les planches, des prélèvements d'échantillons ont été mis en place. Un carottage a donc été réalisé, 3 carottes de bois ont été prélevées à l'aide d'une scie cloche de 20 mm de diamètre sur chaque planche à étudier. Ces échantillons ont ensuite été acheminés vers les locaux de l'INRAE de Cestas Pierroton (Gironde). Un broyeur à billes de haute performance a permis d'obtenir des poudres d'une granulométrie inférieure à 60 mesh. Les poudres obtenues ont par la suite été mises en macération dans 10 mL d'acétone à température ambiante pendant 4 h pour obtenir un extrait, qui a ensuite été analysé par chromatographie.

Analyses de chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

30 mg d'extrait de macération ont été solubilisés dans 4 mL d'un mélange de solvants (3 mL de méthanol et 1 mL d'acétone). Trois gouttes d'une solution de phénophtaléine (indicateur coloré, 1 %_m dans du méthanol) ont été ajoutées puis une solution d'hydroxyde de tétraméthylammonium (6 % dans méthanol) a été ajoutée jusqu'à coloration persistante de la solution à analyser (couleur variant du rose pour des échantillons neufs/récents/peu oxydés à rouge orangé pour des échantillons oxydés/traités thermiquement). Cette solution a ensuite été filtrée dans un vial d'analyse puis injectée dans l'appareil de chromatographie.

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 µL, débit d'injection : 10 mL/min, gaz vecteur : hélium, température de l'injecteur : 300 °C
- Colonne : Elite-5MS longueur : 30 m, diamètre : 250 µm, épaisseur de film : 0,25 µm
- 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

Résultats et discussions

La première observation pouvant être faite est l'influence de la température des séchages sur la couleur des planches comme le montre la photo en Fig.2 :



Fig. 2 : Photo des planches séchées et thermotraitées

Le SSV et les THT à 140 et 175 °C semblent n'avoir que peu d'influence sur la couleur du bois contrairement au THT 210 °C, qui lui provoque un brunissement du bois. Les planches issues du THT à 140 °C présentent quant à elle un aspect de surface glacé qui en première hypothèse pourrait être de la colophane ayant migrée depuis le cœur du bois. Avant de poursuivre les caractérisations, les planches ont toutes été rabotées et la sciure récupérée pour des analyses complémentaires (non présentées ici). Les planches ont ensuite été placées dans l'exsudeuse pour réaliser le test d'exsudation (Tab. 1).

Tab. 1 : Résultats des tests d'exsudation en fonction du séchage/traitement thermique appliqué au bois

| Référence | AAC REF 80°C | ACC 55°C | ACC 55°C /80°C | ACC 50°C HR | ACC 50°C | SSV 80°C | THT 140°C | THT 175°C | THT 210°C | BB |
|-------------------------|---|---|--|---|---|-------------|--------------|--------------|--------------|-----|
| Niveau d'exsudation | +++ | ++ | +++ | ++ | ++ | + | - | 0 | 0 | +++ |
| Echelle d'exsudation |  |  |  |  |  | | | | | |
| | 0 | - | | + | ++ | +++ | | | | |

Les traitements ACC et BB semblent peu efficaces pour endiguer le phénomène d'exsudation puisque les planches ont présenté des coulures de résines plus ou moins importantes.

Le SSV est plus efficace mais pas suffisant puisque des traces d'exsudation sont tout de même apparues. Les THT, quant à eux, ont été particulièrement efficaces puisque aucunes coulures de résine n'ont été observées après le test d'exsudation. Plus la température du traitement est élevée et plus le phénomène d'exsudation semble diminuer. Afin de rationaliser les résultats de ces tests, des analyses de chromatographie ont été réalisées avec pour objectif de suivre l'évolution du taux de térébenthine en fonction du traitement appliqué au bois.

Les chromatogrammes présentés en Fig. 3 montrent les effets des traitements thermiques : la zone à gauche correspond aux pics caractéristiques de l'essence de térébenthine. Plus la température du traitement est élevée et plus ces pics ont tendance à diminuer jusqu'à disparaître pour le THT 210 °C. La Fig. 4 montre l'évolution des taux en térébenthine, colophane et produits de dégradation. Le taux en térébenthine est clairement plus faible pour les THT 175 et 210 °C, passant de $5,2 \pm 0,49$ % à respectivement $2,69 \pm 0,72$ % et $0,57 \pm 0,39$ %.

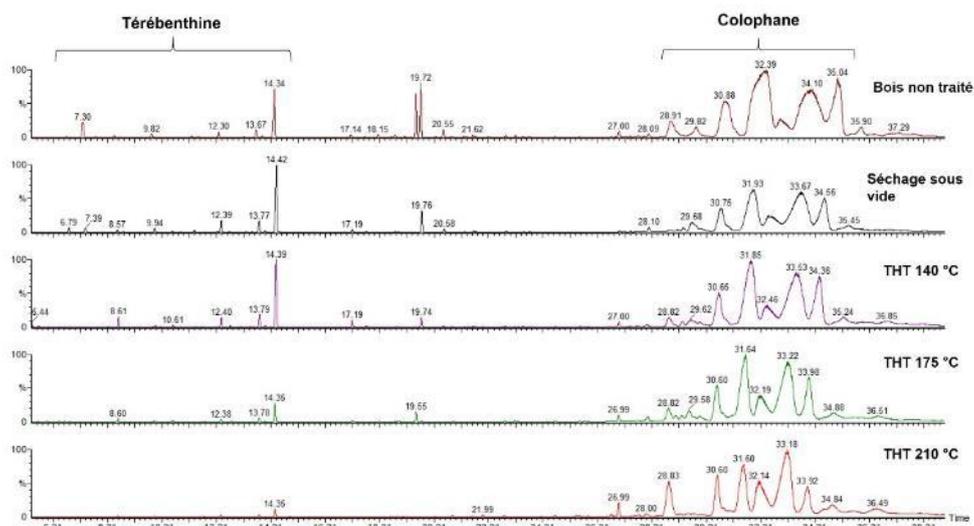


Fig. 3 : Chromatogrammes GC-MS des macérats en fonction du séchage/traitement thermique appliqué au bois

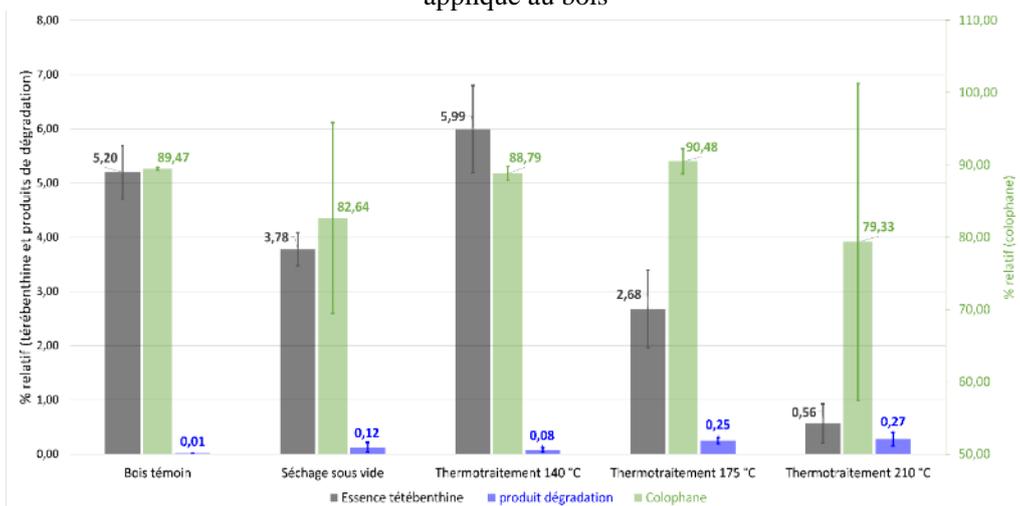


Fig. 4 : Evolution des taux en térébenthine, colophane et produits de dégradation en fonction du séchage/traitement thermique appliqué au bois (carottage, 27 mm)

Bien qu'une migration de la résine ait lieu, créant un film en surface des planches, il semble que le traitement à 140 °C ne soit pas suffisant pour évaporer efficacement la térébenthine. L'augmentation de la température à 175 ou 210 °C permet de passer au-delà du point d'ébullition de la térébenthine, facilitant ainsi son évaporation et permettant de diminuer sa

quantité dans le bois. Un autre effet de l'augmentation de la température serait la diminution de la viscosité de la colophane avec pour conséquence une migration facilitée de la résine en dehors du bois sous l'effet du vide dynamique. Néanmoins, une température trop élevée aura également pour effet d'amorcer des réactions de dégradations chimiques et pourra aussi provoquer des déformations des planches. Le séchage sous vide a été réalisé sur du bois vert et non du bois séché. Les analyses montrent que ce séchage a permis de retirer une partie de la térébenthine présente dans les planches, cependant le taux reste suffisamment élevé pour que de la résine coule au cours du test d'exsudation.

Les différents résultats présentés montrent qu'il est possible de corréler la diminution du pourcentage en térébenthine dans le bois en fonction de la température de séchage ou de traitement, permettant ainsi de diminuer le phénomène d'exsudation, confirmant les conclusions de T. Cabaret. Il sera par la suite nécessaire de réaliser un test d'exsudation en condition réelles, en exposant des lames de bois au soleil en extérieur.

Remerciements

Laurent CASTETS, la Direction et les équipes de production de Gascogne Bois, Clément L'HOSTIS, Claire GOURDET, Stéphane LEGAY, Patrice GARCIA (FCBA), Bertrand CHARRIER, Thomas CABARET, Peguy ENGOZOGHO, Morandise RUBINI, Léo LEROYER, Alexandre SANCHEZ, Jérémy MEHATS, Eduardo ROBLES, Hamza GARRAOUI (UPPA/IPREM Mont de Marsan), Patrick JOYET et Bureau d'Etudes (NEOCLIN), Florence ZARFDJIAN, la Direction et les équipes de production de Lesbats Scieries d'Aquitaine, Benoît DARICAU, la Direction et les équipes de production de la Scierie Labadie.

Références

- Cabaret T. (2018a) L'exsudation de la résine dans le bois de pin maritime (*Pinus pinaster*) : étude et mise en place d'un système de prévention. Thèse de doctorat. Pau.
- Cabaret T., Boulicaud B., Chatet E., Charrier B. (2018b) Study of rosin softening point through thermal treatment for a better understanding of maritime pine exudation. *Eur. J. Wood Prod.* **76**, 1453–1459
- Cabaret T., Gardere T., Frances M., Leroyer L., Charrier B. (2019a) Measuring interactions between rosin and turpentine during the drying process for a better understanding of exudation in maritime pine wood used as outdoor siding. *Industrial Crops and Products*, **130**, 325-331
- Cabaret T., Mariet F., Li K., Leroyer L., Charrier B. (2019b) High temperature drying effect against resin exudation for maritime pine wood used as outdoor siding. *Eur. J. Wood Prod.* **77**, 673–680.
- INRS, Essence de térébenthine (FT 132). Généralités - Fiche toxicologique - INRS. 2011. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_132
- Rubini M., Feuillerat L., Cabaret T., Leroyer L., Leneveu L., Charrier B. (2021) Comparison of the performances of handheld and benchtop near infrared spectrometers: Application on the quantification of chemical components in maritime pine (*Pinus Pinaster*) resin. *Talanta*, **221**, pp.121454.

Dissolution de biopolymères et extraction avec des liquides ioniques biosourcés

Jean-Pierre Mbakidi¹, Mahasoia-Salina Souvenir Zafindrajaona^{1,2}, Dalila Saaoui¹,
Katia Bacha¹, Magdalena Bendova², Sandrine Bouquillon¹

¹Institut de Chimie Moléculaire de Reims UMR CNRS 7312 - Université de Reims
Champagne-Ardenne, Boîte n° 44, B.P. 1039, F-51687 Reims, France

²Institute of Chemical Process Fundamentals of the CAS (IPCF) - Rozvojová 135/1, 165 00
Prague 6, Czech Republic
jean-pierre.mbakidi@univ-reims.fr

Mots clefs : biomasse, cellulose, choline, dissolution, extraction, lignine, liquide ionique

Contexte et objectif

Les solvants jouent un rôle important dans l'industrie chimique et sont au cœur de nombreuses applications telles que la formulation de pesticides, d'encres ou de peintures, les procédés industriels de nettoyage ou d'extraction des biomolécules (polymères ou principes actifs naturels), la synthèse et la séparation. L'épuisement des réserves fossiles et l'impact des émissions de CO₂ sur le changement climatique incitent au développement d'alternatives à l'utilisation de solvants pétrosourcés qui ont un impact très défavorable sur l'environnement et la santé. De ce fait, les fluides supercritiques et des solvants fluorés, appelés solvants verts, ou les liquides ioniques sont apparus comme une alternative capable de répondre à un grand nombre de spécifications requises dans diverses applications (Welton 2018).

Dans ce contexte lié aux questions sur le développement durable, à la disponibilité des matières premières d'origine pétrochimique et à la naturalité souhaitée par les consommateurs, le terme « biosourcé » apparaît de plus en plus. Dans ce projet, nous avons développé des liquides ioniques biosourcés, qui sont préparés selon plusieurs principes de chimie verte, à partir d'agroressources, alternatives innovantes en matière de sourcing (Fig. 1) (Mbakidi et Bouquillon 2020). Ces solvants présentent de faibles toxicités (éco- & cyto-toxicité) (Mbakidi et al. 2021) et peuvent être utilisés dans la dissolution (Mbakidi et al. 2022) (Fig. 2) ou l'extraction de biopolymères (cellulose ou lignine Kraft) à partir de sourcing végétal comme l'écorce de bois ou l'anas de lin. L'objectif final serait de les transformer pour pouvoir les utiliser dans la conception des nouveaux biomatériaux.

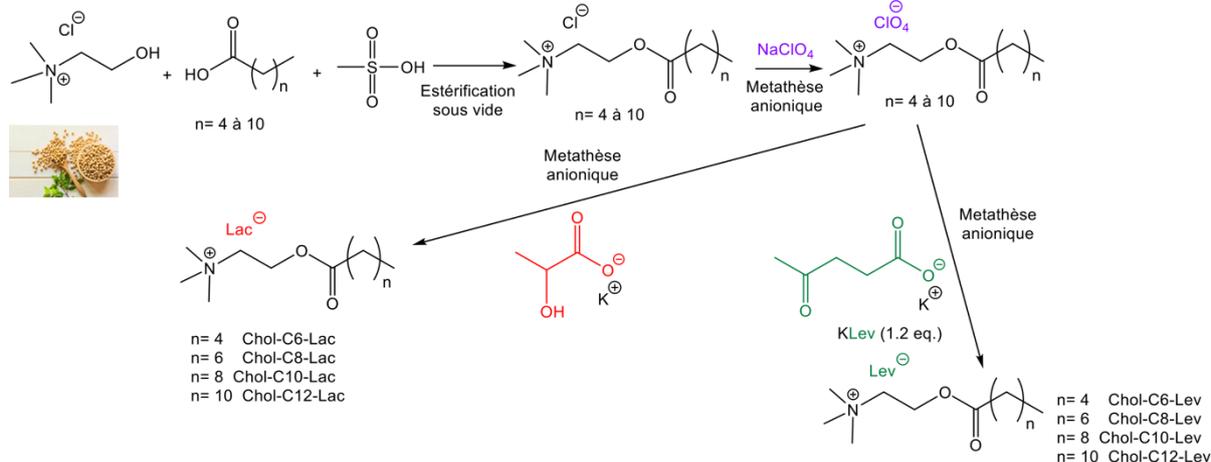


Fig. 1 : Synthèse des liquides ioniques biosourcés

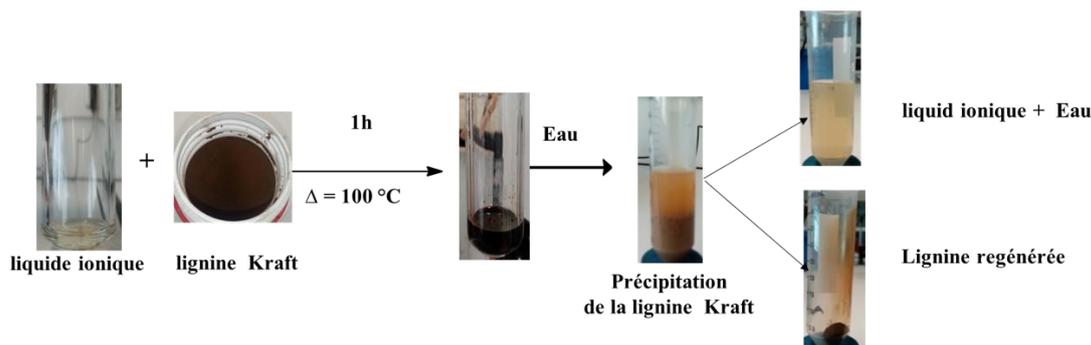


Fig. 2 : Dissolution de la lignine Kraft à 100 °C dans les différents liquides ioniques (Lis)

Matériel et méthode

La lignine est dissoute pendant 1 h dans les différents liquides ioniques, ensuite elle est régénérée sans modification chimique (confirmé par infrarouge) après une addition d'eau dans le milieu ionique.

Résultats et discussion

La Fig. 3 regroupe les résultats de dissolution de la lignine kraft (en % massique) obtenus avec différents liquides ioniques biosourcés. Les résultats montrent que l'ensemble des liquides ioniques biosourcés dissolvent efficacement la lignine kraft avec des pourcentages de dissolution comprise entre 25 % et 65 %. En outre, la Fig. 3 indique que les liquides ioniques dérivés de choline estérifiés présentant un anion lévulinate ([Chol - Cn]Lev.) permettent une meilleure dissolution de la lignine que ceux avec un anion lactate ([Chol - Cn]Lac.). Ce résultat peut s'expliquer par le caractère plus basique apporté par l'anion lévulinate ($pK_a = 4,6$) par rapport à l'anion lactate ($pK_a = 3,9$) ; ce qui améliore l'interaction du liquide ionique avec le biopolymère (lignine). On observe également qu'avec les esters de choline à courte chaîne carbonée ([Chol - C6]Lev et [Chol - C8]Lev) qui sont beaucoup moins visqueux que ceux à longue chaîne carbonée nous arrivons à dissoudre jusqu'à 65 % en masse de lignine Kraft.

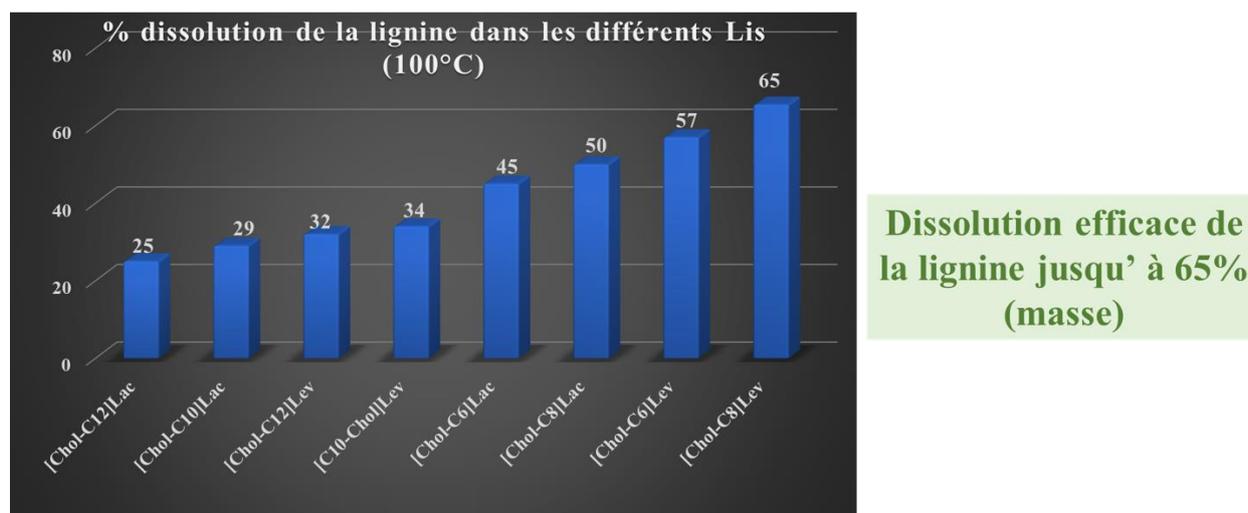


Fig. 3 : Pourcentage massique de dissolution de la lignine Kraft à 100 °C dans les différents liquides ioniques (Lis)

Conclusion et perspectives

De nouveaux liquides ioniques à base de choline ont été synthétisés grâce à un procédé en trois étapes. L'ensemble de ces liquides ioniques biosourcés présentent d'excellentes propriétés de

dissolution de la lignine. En particulier la combinaison d'une chaîne carbonnée courte (C6 ou C8) sur les esters de choline avec un anion lévulinate favorise une meilleure dissolution du biopolymère (lignine).

Dans la suite de nos travaux nous envisageons d'extraire sélectivement la lignine à partir des écorces du bois de Douglas ; ce travail est en cours.

Remerciements

Nous remercions l'URCA et le FEDER (Programme d'Excellence Amisolver) pour les bourses post-doctorales (D.S. et J.P.M.) et le soutien financier ainsi que la SATT Nord pour le fonctionnement et le soutien financier d'un poste d'ingénieur (J.P.M.).

Références

Mbakidi J.-P., Barjhoux I., Aguibi K., Geffard A., Rioult D., Palos Ladeiro M., Bouquillon S. (2021), Synthesis of New Betaine-Based Ionic Liquids by Using a “One-Pot” Amidation Process and Evaluation of Their Ecotoxicity through a New Method Involving a Hemocyte-Based Bioassay. ACS Sustainable Chem. Eng., 9, 15427.

Mbakidi J.-P., Bouquillon S. (2020) PCT/EP2020/070365

Mbakidi J.-P., Kerkache A., Lazar F., Bouquillon S. (2022) Dissolution of Cellulose and Lignin with Biobased Ionic Liquids. J. Solution Chem., 51(3):1.

Welton T. (2018) Ionic liquids: a brief history, Biophysical Reviews, 10, 691-706.

Experimental measure of the memory strain of wood sample during drying

STÉPHAN Antoine¹, PERRÉ Patrick², L'HOSTIS Clément³, RÉMOND Romain¹

¹LERMAB, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Épinal, France

²LGPM, CentraleSupélec, Centre Européen de Biotechnologies et de Bioéconomie (CEBB),
Université Paris-Saclay, 3 rue des Rouges Terres, 51110 Pomacle, France

³FCBA, 10 rue Galilée, 77420 Champs-sur-Marne, France

antoine.stephan@univ-lorraine.fr

Key words: mechano-sorption; viscoelasticity; wood drying; stress relaxation; beech; RT plan

Context and objectives

As the industrial drying of wood is a very high consuming stage the integration of renewable energies and heat recovery in the process could reduce its cost and environmental impact. Beside the traditional fuel boilers or nuclear electricity used as heat source, the renewable energy and energy recovery (EnR&R) are intermittent and often at a low exergy. These characteristics could have an important effect on the internal stress and deformation of the drying wood. If the viscoelasticity of the wood may be inhibited by the low temperature, the mechanosorptive creep could be activated by the cyclic variations of moisture content of wood. This mechanism could reduce internal stress, which allows a higher drying rate with no loss of dried product quality. The mechanosortive effect have been observed by Armstrong and Kingston (1960) and further studied until now. A rheological model of this phenomena has been proposed under several forms (Leicester 1971, Ranta-Maunus 1975, Grossman 1976, Hunt 1984, Bazant 1985, Colmar et al. 2014).

Several devices were built to measure the strain and stress of wood samples with moisture variations and under load. They were oriented for structural beams or for thin samples of wood, with load parallel to grain (Hunt 1984, Navi et al. 2002, Randriambololona 2003, Dubois et al. 2005) or perpendicular (Schnieuwind 1966, Toratti and Svensson 2000) to grain. The drying of originally wet wood under tensile load has been studied in the grain direction (Dubois et al. 2005). In this work, an original apparatus has been designed to evaluate the memory deformation during drying of a hardwood sample with constrained shrinkage in a direction perpendicular to the grain.

Material and methods

Apparatus and operation principle

The first apparatus consists of a two-pronged fork milled in a single aluminium plate with a thin prong that is considered as a cantilever beam, and a parallel thick prong that is seen as infinite rigid body (Fig. 1). A movable blocking member (the B-element in Fig. 1) can be attached on the fork device to reduce the length between the fixed end and the free end of the cantilever beam. It thus modifying the stiffness of the beam. To easily analyse the relation between beam's deflection and loading the experiences have been made in the elastic domain. Only small deflections have been occurred, and the beam is considered slender as its length to height ratio is greater than 10; in such case the shear deformations were not taken into account and the mechanical analysis could be simplified. The fork force-displacement calibration curve has been established by measuring the displacement of the fork via a linear variation differential transducer (LVDT, C-element in Fig. 1) for several known weights placed at the free end.

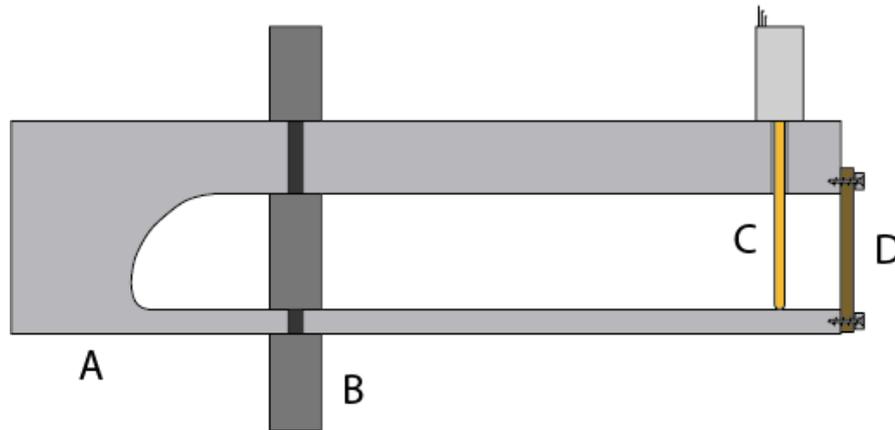


Fig. 1 : Schematic cut of the “Fork” apparatus composed of an aluminum fork (A), a movable blocking member (B), an LVDT (C) and a sample (D) screwed to the free end of the fork.

Clamps were screwed to the end of the beam and to the support to hold a wood sample (the D-element in Fig. 1). A thin rubber pad was placed between the sample and the clamps to maximize contact, even with dimensional variations of the sample. The other side of the sample is in contact with an abrasive sheet glued to the beam or support. No slippage of the sample was observed during the tests in this configuration.

As the moisture content of the wood sample changes, the wood material will shrink or swell, causing displacement of the end of the aluminium beam. The wood sample is then in a constrained shrinkage or swelling configuration. Measurement of beam displacement provides both the strain of the wood sample, and the force applied to the wood sample via the fork force-displacement calibration curve. One LVDT (OP/6/G from Solartron Metrology, UK) was used to measure the fork deformation (C-element in Fig.1).

In parallel with the fork test, another simple device with two additional LVDTs (DFg2.5 and DFg5 from Solartron) measures the swelling/shrinkage of the cross section of a twin wood sample. It allows to measure the section changes of the sample in a free shrinkage or free swelling configuration.

The experiment was placed in a climate chamber that controls humidity and temperature of the surrounding air.

In the tests presented in this work, the sample was placed and clamped on the fork device in the green state. As a result, a constrained shrinkage occurs during drying and the sample is subjected to tensile stress throughout the test. The conditions inside the climatic chamber were measured by an SHT85 (Sensirion, Switzerland). The signals coming from the LVDT was acquired by a Digital Acquisition Centrale 34970A (Keysight Technologies, California). The measurements were recorded in a PC program developed with Labview.

Wood sampling

Three twin samples were cut into a beech log in green state, which never entered the hygroscopic domain. The log was quarter sawn prior to the sample cut. The samples were 75 mm long in the radial direction, 10 mm wide in the tangential direction, and 3 mm thick in the longitudinal direction. Due to of the small length of the sample in the grain direction, it was assumed that there was no moisture gradient within the material. Indeed, the moisture transfer coefficient is much higher compared to that in the cross-grain direction.

The first of them has been reduced from both ends to have a length of 50 mm in the radial direction; it was the sample for free shrinkage and swelling measurement. It had the same length

as the distance between the clamps of the fork in idle state. The second sample has been clamped in the fork test. The third sample has been tested on tensile device to determine the module of elasticity in green state. Then it was placed in the same climatic chamber with the other two samples.

Measure of strains

The swelling and shrinking coefficients were assumed to be the same for all twin samples. It was then possible to determine the stress inside the sample in the fork:

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A(t)} \quad (1)$$

where $F(t)$ is the force applied to the sample at time t and $A(t)$ the area of the cross section of the wood sample at the same time t (TL plan). The latter is determined using the free shrinkage and swelling test bench, which gives the deformations of the TL plan during the experiment.

The strain in the radial direction to the sample section was considered as follows:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{shsw} + \varepsilon_{ms+ve} \quad (2)$$

The strain due to swelling and shrinkage ε_{shsw} was calculated using the following Eq. 3 :

$$\varepsilon_{shsw}(t) = \frac{\Delta l_{shsw}(t)}{l_{shsw,0}} \quad (3)$$

where Δl_{shsw} is the displacement of the twin sample in the radial direction and $l_{shsw,0}$ is the initial length of the twin sample in the radial direction.

The elastic strain ε_{el} is calculated with the one-dimensional form of Hooke's law as follows:

$$\varepsilon_{el}(t) = \frac{\sigma(t)}{E} \quad (4)$$

Where σ was calculated in Eq. 1 and E is the module of elasticity of the sample measured in air dried state, at the end of the experiment, by tensile test.

Since

$$\varepsilon_{tot}(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_{tot,0}} \quad (5)$$

where $l_{tot,0}$ is the initial length of the sample between the fork clamps, and Δl the variation of the sample length.

It was then possible to isolate the memory strain ε_{ms+ve} , the strain due to viscoelastic and mechanosorptive behavior of the material from Eq. 2 and Eqs. 3, 4 and 5.

Results and discussion

The conditions applied (Fig. 2) were chosen to maximise the memory strain, in particular the mechanosorptive part due to the low temperature, which cannot activate the viscoelastic behaviour. Some cyclic moisture variations were applied, to obtain a stress relaxation, as well as moisture variations with some moisture content that had never been seen before.

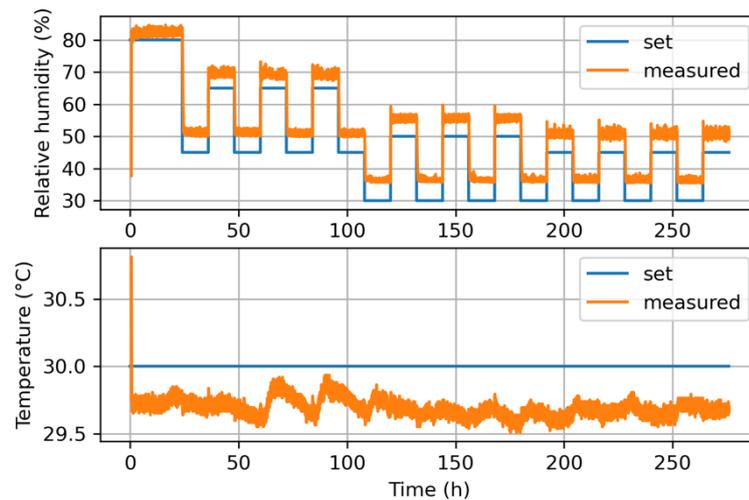


Fig. 2 : Evolution of the boundary conditions in the climate chamber

The different strains obtained are shown in Fig. 3. The shrinkage strain is the major contributor to the total deformation. Shrinkage is constrained by the fork, the total deformation of the sample is then lower, with a small amount of elastic strain and a large amount of memory strain. This strain seems to tend to a limit, that might take into account the mechanosorptive creep limit (Hunt and Shelton 1988). The moisture content step at around 100 hours was supposed to entail an important mechanosorptive deformation because the new MC had never been seen before, as between 0 and 40 hours, which is not the case.

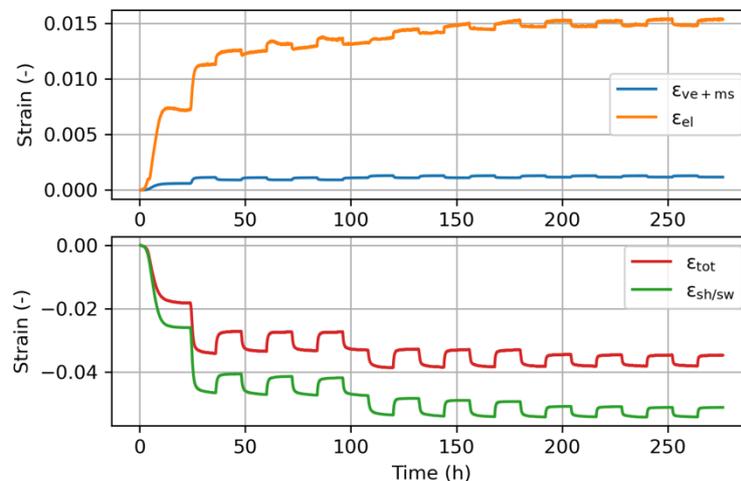


Fig. 3 : Evolution of the different contributions to the total strain measured on the sample placed in the fork device.

The evolution of the stress (Fig. 4) shows a slight relaxation with the cyclic moisture variations. In the hypothesis of a tensile strength of 7 MPa for beech in the radial direction (Ehrhart et al. 2018), the maximum stress applied to the wood sample was less than 40 % of this value, which could suggest that the viscoelasticity had a linear behavior during the test (Mukudai 1983).

Conclusion and perspectives

Using an original apparatus, the viscoelastic and mechanosorptive contribution to the total creep of a wood sample under stress has been successfully isolated. Originally in green state, the wood sample discovered for the first time the hygroscopic domain and moisture contents never

seen before; this situation produced slight stress relaxations for each cyclic moisture variation and a more important strain when new moisture contents were encountered. This test should be performed for different hardwood species, load amplitudes and orientations in order to have representative values of the hygroactivated strain that could be compared with a rheological model. The separation of the viscoelastic and mechanosorptive contribution in the memory strain could benefit to the model improvement but requires further investigations as they act together during the test and are both hygroactivated. The work goes further in this direction to adapt a computational model coupled with an optimization code, with the aim of generating drying schedules adapted to intermittent energies.

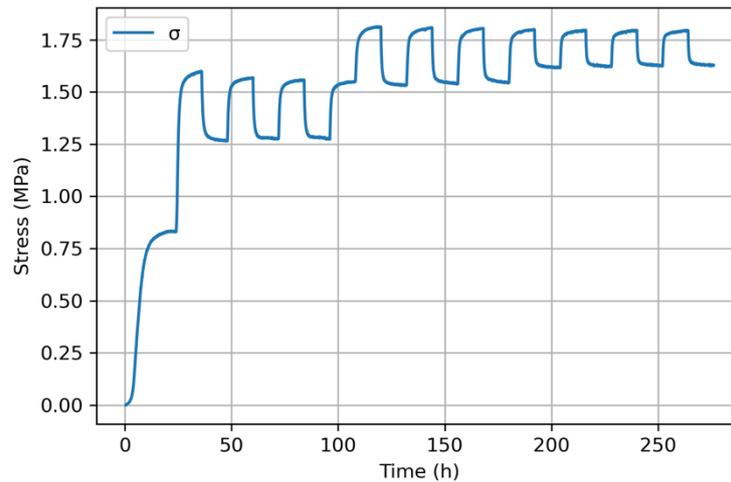


Fig. 4 : Evolution of the stress in the sample placed in the “fork” device.

Acknowledgements

ADEME is a partner of the project and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

References

- Armstrong LD., Kingston RST (1960) Effect of moisture changes on creep in wood, *Nature*, 185(4716), 862-863.
- Bažant ZP (1985) Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature, *Wood science and Technology*, 19(2), 159-177.
- Colmars J, Dubois F, Gril J (2014) One-dimensional discrete formulation of a hygrolock model for wood hygromechanics, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 18, pp. 309-328.
- Dubois F, Randriambololona H, Petit C (2005) Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 9, 173-202.
- Ehrhart T, Steiger R, Palma P, Frangi A (2018) Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation, 6 p.
- Grossman PUA (1976) Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour, *Wood science and technology*, 10(3), 163-168.

Hunt DG (1984) Creep trajectories for beech during moisture changes under load, *Journal of materials science*, 19, 1456-1467.

Leicester RH (1971) A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams, *Wood Science and technology*, 5(3), 211-220.

Mukudai J (1983) Evaluation of linear and non-linear viscoelastic bending loads of wood as a function of prescribed deflections, *Wood Science and Technology*, 17(3), 203-216. Navi, P, Pittet, V, Plummer, CJG (2002) Transient moisture effects on wood creep, *Wood Science and Technology*, 36(6), 447-462.

Randriambololona H (2003) Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable, Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, Ecole Doctorale Science, Technologie et Santé.

Ranta-Maunus A (1975) The viscoelasticity of wood at varying moisture content, *Wood science and technology*, 9(3), 189-205.

Schniewind AP (1966) Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 24(3), 87-98.

Toratti T, Svensson S (2000) Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads, *Wood Science and Technology*, 34(4), 317-326.

Évaluation des propriétés de transfert d'humidité par analyse inverse de la cinétique de séchage d'une pile de bois dans un séchoir industriel

SIMO-TAGNE Merlin¹, STÉPHAN Antoine¹, PERRÉ Patrick^{2,3}, L'HOSTIS Clément⁴, RÉMOND Romain¹

¹Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F-88000 Epinal, France

²Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, France

³Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Université Paris-Saclay, Pomacle, France

⁴FCBA, Bordeaux, France

merlin.simo-tagne@univ-lorraine.fr

Mots clés : Séchage industriel ; approche déterministe ; perméabilité liquide ; coefficient de diffusion

Contexte et objectifs

Le séchage du bois d'œuvre est une étape indispensable pour amener le bois à son humidité d'utilisation. Durant ce processus, plusieurs paramètres doivent être contrôlés afin d'assurer la rapidité de l'opération, la qualité des produits et la maîtrise du coût du séchage. Selon l'essence de bois et l'épaisseur, des conduites empiriques ont été proposées dans la littérature (Aléon 2012, Joly et More-Chevalier 1980). Réduire l'énergie consommée lors de cette opération est un besoin prégnant tout en conservant les autres attentes de l'opérateur en termes de qualité, coût et durée.

L'évolution des moyens de calculs et le caractère prédictif des outils de simulation numérique du séchage permettent désormais d'espérer placer l'approche déterministe au cœur du processus de décision de la conduite de séchage du bois d'œuvre. Pour cela, il est nécessaire que l'outil numérique puisse connaître d'où l'on part, i.e. les spécificités et caractéristiques des piles de bois, qui ont leur authenticité propre en terme de cartographie des débits dans la pile, d'humidité initiale, etc. Le travail récent de Ouertani et al. (2023a) a montré que le code *TransPore* (Perré et Turner 1999) pouvait, par analyse inverse, estimer des paramètres de transfert à partir de la cinétique de séchage au niveau du cœur de la planche. Dans ce travail, la mesure a été effectuée avec un densitomètre à rayons-X et selon un protocole qui ne peut être appliqué qu'en laboratoire. Au niveau des séchoirs industriels, la cinétique de séchage de la charge de bois est décrite par le suivi de l'humidité locale d'une dizaine de planches, jugées représentatives de la charge de bois. L'humidité est mesurée par méthode résistive avec des sondes enfoncées dans les planches à des épaisseurs données. Les sondes résistives ont du mal à donner des informations justes dans le domaine non hygroscopique du bois et les fluctuations rapides de la température de l'air de séchage amplifient l'erreur sur la valeur donnée par les sondes d'humidité (L'Hostis et al. 2020).

Le travail présenté ici vise à confronter cette approche à la réalité des conditions industrielles en tentant d'utiliser le code pour déterminer la perméabilité liquide (K_L) et le coefficient de diffusion massique de l'eau liée (D_b) par analyse inverse des cinétiques de séchage de planches instrumentées. Ici nous nous situons à une étape intermédiaire, échelle semi-industrielle, avec un protocole de mesures intermédiaire entre le laboratoire et l'industrie. L'objectif ultime serait que le code puisse apprendre à partir des données collectées par les sondes résistives pour ensuite choisir les conditions optimales à appliquer dans le séchoir afin de satisfaire les attentes

de l'opérateur sur la qualité, la durée, le coût et la consommation énergétique de l'opération de séchage.

Matériel et méthode

Le séchoir semi industriel de FCBA (Fig. 1a) a été utilisé pour sécher une pile de planche. C'est un séchoir à air chaud climatisé constitué (1) de batteries de chauffe, (2) de ventilateurs assurant le passage de l'air dans à travers la pile, (3) des extracteurs constitués de petits ventilateurs positionnés proche des clapets qui facilitent l'évacuation de l'air humide de la chambre de séchage, (4) de rails et d'un peson permettant respectivement le positionnement du chargement et la mesure de la perte de masse lors du séchage de la charge de bois, (5) d'un déflecteur qui concentre le flux d'air sur la hauteur de la pile et (6) des capteurs, sondes résistives de mesure d'humidité du bois, des psychromètres pour mesurer l'humidité dans l'air, des PT100 et thermocouples pour mesurer respectivement la température dans l'air et dans le bois. Les dimensions intérieures du séchoir sont de 2,7 m de long, 2,4 m de large et 2,8 m de haut avec une épaisseur des parois de 0,15 m. Deux compteurs d'énergie équipent le séchoir, l'un pour suivre l'énergie consommée par les ventilateurs et l'autre celle des batteries de chauffe.

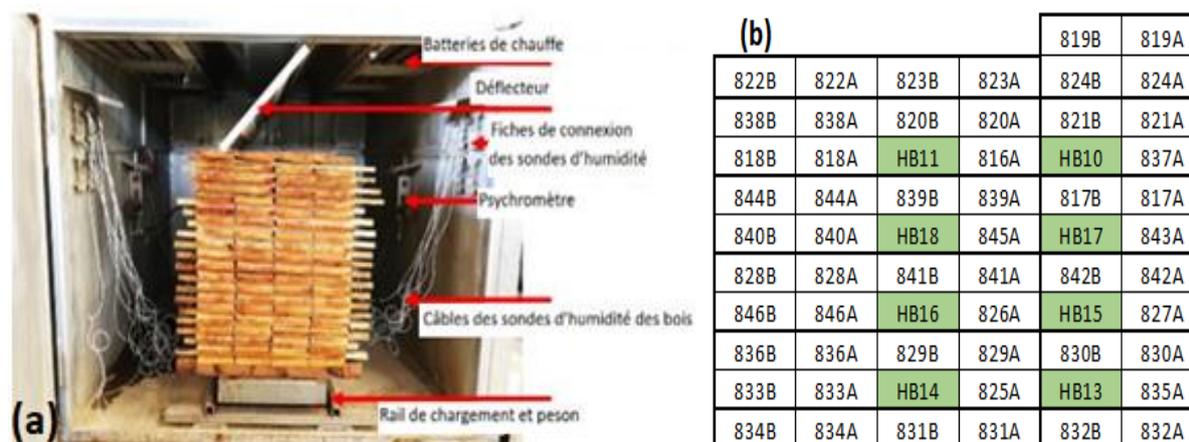


Fig. 1 : Séchoir semi-industriel de FCBA: (a) et cartographie de la pile de bois (b)

Dans notre expérience, 62 planches de bois de hêtre dépéri forment la pile de bois, dont 8 portent des sondes d'humidité, positionnées comme l'indique la Fig. 1b (références HB en vert). Le débit de chaque planche est relevé, ainsi que leurs dimensions et leurs masses initiale et finale (i.e. avant et après séchage). A la fin du séchage la teneur en eau à cœur est mesurée par méthode résistive sur toutes les planches. En supposant une humidité homogène à la fin du cycle, cette mesure permet avec la perte de masse mesurée de remonter à l'humidité initiale moyenne de chaque planche. La Fig. 2 présente l'évolution des conditions de séchage imposées (Fig. 2a), et de la cinétique de séchage des 8 planches suivies (Fig. 2b). Les dimensions des 68 planches testées sont de 2 m de long, 0.16 m de large et 56 ± 1 mm d'épaisseur. Les sondes d'humidité sont enfoncées à cœur dans les 8 planches étudiées. Les baguettes utilisées ont une épaisseur de 30 mm en moyenne.

Nous avons déterminé en laboratoire (LERMaB-Epinal) la perméabilité liquide et le coefficient de diffusion massique de l'eau liée sur des rondelles tirées des 8 planchettes suivies ci-dessus. Les dimensions des éprouvettes obtenues étaient de $68,5 \pm 0,5$ mm de diamètre et $8,5 \pm 0,5$ mm d'épaisseur. Deux à trois échantillons ont été découpés par planche. Les mesures de la perméabilité liquide et de la diffusivité massique de l'eau liée ont été effectuées sur les mêmes échantillons respectivement suivant les méthodes « ALU-CHA » (Perré et Agoua 2002) et

« PVC-CHA » (Zohoun et al 2003). Les conditions expérimentales sont les mêmes que celles utilisées par Ouertani et al (2023b).

Dans un premier temps, le code numérique *TransPore* (Perré et Turner 1999), code simulant les transferts couplés masse-chaaleur à l'échelle locale de la planche, a été utilisé pour déterminer le coefficient de diffusion massique et la perméabilité liquide de chaque planche instrumentée par une analyse inverse à partir de leur cinétique de séchage. L'algorithme du Simplex a été utilisé pour minimiser la fonction objective définissant l'écart entre les cinétiques à cœur calculées et mesurées. Des informations complémentaires sont données dans Ouertani et al (2023a). A noter pour cette analyse inverse, *TransPore* utilise comme conditions aux limites les caractéristiques de l'air à l'entrée de la pile et non au sein de la pile, autour de la planche instrumentée. Comme conditions initiales, *TransPore* utilise les valeurs mesurées sur les planches instrumentées, i.e. l'humidité moyenne, l'humidité à cœur et l'épaisseur de la planche. Les mesures sur site ont révélé des planches ayant une hétérogénéité forte d'humidité initiale, avec une humidité au cœur de la planche autour de 60% et une humidité moyenne de 35%. Le code a été adapté dans ce travail afin de pouvoir partir d'un profil d'humidité à l'état initial hétérogène dans l'épaisseur. Une fonction polynomiale a été utilisée pour que l'humidité maximale, à cœur, soit celle mesurée par la méthode résistive, que la moyenne du profil soit celle mesurée par pesées et que l'humidité en surface soit l'humidité d'équilibre de l'air extérieur, soit ici 15%. Les caractéristiques moyennes du bois de hêtre ont été utilisées pour les autres paramètres nécessaires au modèle. Elles sont résumées dans Thouraya et al. (2017).

Dans la partie suivante, une comparaison est faite entre les valeurs des paramètres physiques identifiées par analyse inverse et celles mesurées expérimentalement en laboratoire.

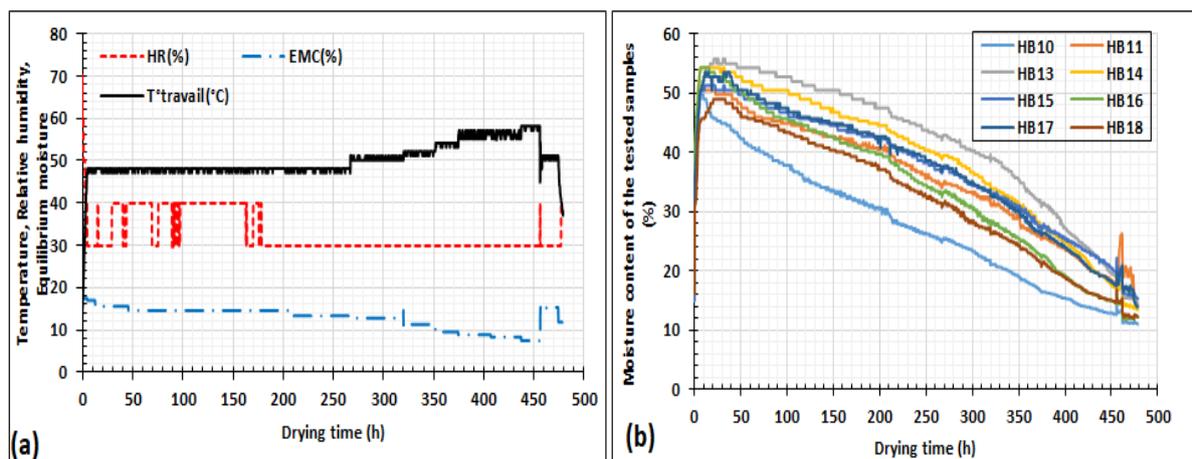


Fig.2 : Conditions de séchage appliquées dans le séchoir(a) et mesures des humidités à cœur effectuées sur les planches instrumentées(b)

La Fig. 3 présente deux exemples des courbes des cinétiques de séchage expérimentales et prédites par *TransPore* à l'issue de l'analyse inverse. Il faut noter que les sondes résistives ont donné un signal incohérent sur les dix premières heures (humidité à cœur inférieure à 20% au début du cycle), lors de la montée en température de la charge de bois. Ces points n'ont pas été pris en compte pour l'analyse inverse. Il reste néanmoins une incertitude sur l'humidité à cœur à l'état initial. Nous avons alors choisi d'étudier l'influence de la teneur en eau initiale à cœur sur les identifications renvoyées par le code en prenant comme teneur en eau initiale à cœur soit la valeur maximale mesurée par la sonde résistive sur les 15 premières heures de séchage, soit cette valeur à laquelle on ajoute +5%.

Résultats et discussion

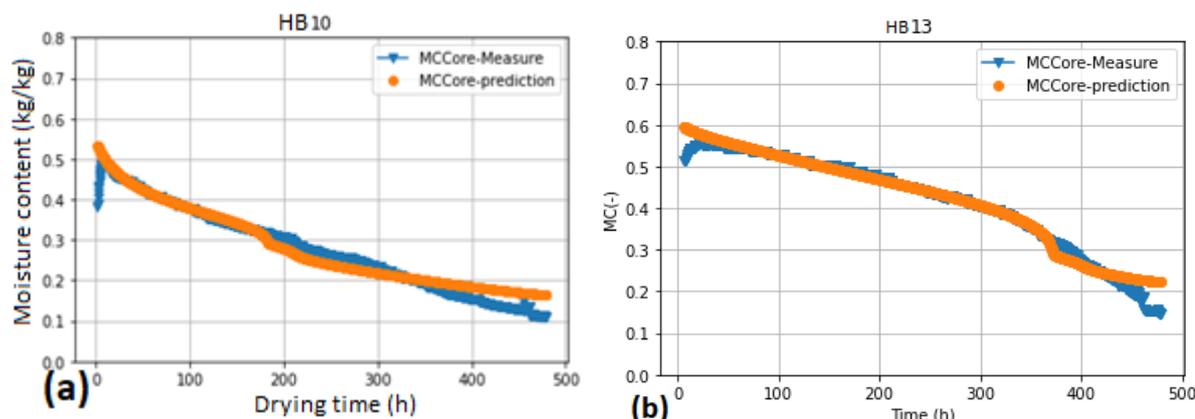


Fig. 3 : Exemples des confrontations des cinétiques de séchage expérimentales (*Measure*) et numériques (*Prediction*), planches HB10 (+5%) et HB13 (+5%).

La Fig. 4 présente les perméabilités (Fig. 4a) et les coefficients de diffusion de l'eau liée (Fig. 4b) des échantillons de bois provenant des 8 planches suivies. Les valeurs expérimentales et celles estimées par méthode inverse sont comparées. Les résultats expérimentaux sont du même ordre que ceux de la littérature (Ouertani et al 2023b ; Agoua et al 2001). Nous constatons que le code sous-estime les coefficients de diffusion de l'eau liée avec un rapport moyen de 2,55, les rapports allant de 2,02 (HB18) à 3,34 (HB13). Ce constat est nuancé dans le cas de la perméabilité liquide. Le code sous-estime les perméabilités liquides de six échantillons avec des rapports allant de 2,51 (HB17) à 11,60 (HB13). Dans deux cas, les valeurs renvoyées par le code sont supérieures à celles obtenues expérimentalement avec des rapports de 15,60 (HB11) et 19,1 (HB10). La figure 4 montre les valeurs obtenues par analyse inverse en prenant comme point haut du profil parabolique d'humidité initial la valeur maximale à cœur ou celle majorée de +5% (voir commentaire précédent). Cela nous permet de constater que la teneur en eau initiale des planches (mal estimée par les sondes résistives) influence la valeur renvoyée par le code sur la perméabilité liquide, et moins sur le coefficient de diffusion.

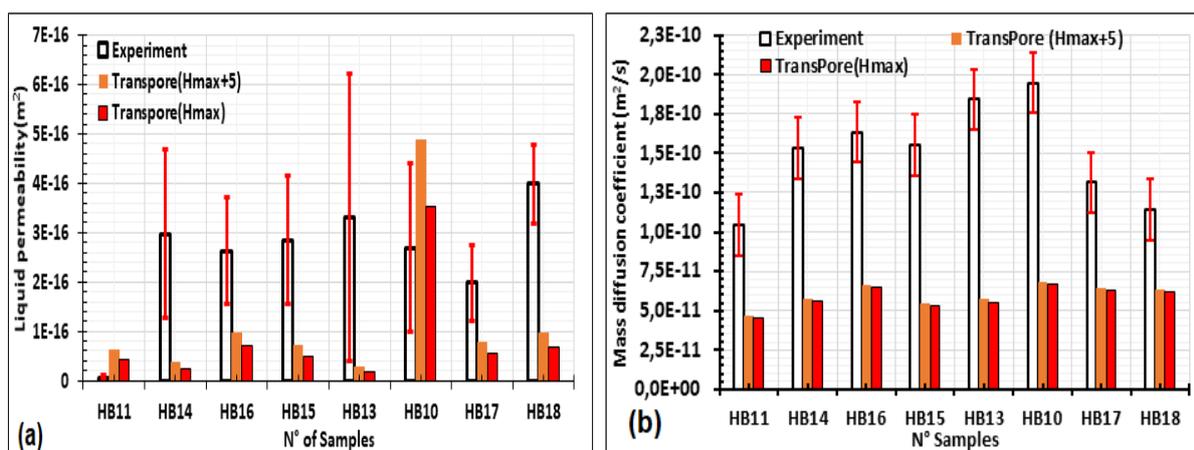


Fig. 4 : Comparaison des mesures expérimentales et par méthode inverse: (a) perméabilités liquides ; (b) coefficients de diffusion de masse de l'eau liée (b) .

Nous voyons ici que la transposition d'une méthode validée et éprouvée en laboratoire (Ouertani et al. 2023a, Perré et al. 2015) au contexte industriel s'avère pour le moment compliquée. L'analyse inverse présentée ici peine à trouver les valeurs des paramètres de transfert des planches en raison de l'incertitude de la forme du profil initial d'humidité dans la

planche et l'incertitude de la mesure des sondes résistives dans le domaine de l'eau libre et lors des variations de température.

La dernière partie de cette communication vise à regarder la capacité de l'analyse inverse à identifier le jeu de paramètre assez tôt pendant le séchage, i.e. sur une fenêtre temporelle réduite de la cinétique de séchage, dans la perspective d'utiliser le code sur la partie temporelle restante pour trouver les conditions de séchage optimales. Les Tab. 1 et 2 présentent des estimations respectivement du coefficient de diffusion de l'eau liée et de perméabilité liquide données par *TransPore* et les erreurs associées par rapport à la valeur identifiée en considérant toute la cinétique, la teneur en eau initiale étant celle maximale de la cinétique + 5%. La portion de la cinétique considérée dans l'analyse inverse est de 20%, 40%, 63%, 80% et 100% de la durée de séchage. L'exemple est donné pour la planche HB10. On observe que l'estimation du coefficient de diffusion obtenue en utilisant 40% (190h) de la durée de séchage donne déjà une valeur à 17,9% près de la valeur obtenue en utilisant toute la durée. Dans le cas de la perméabilité liquide, en utilisant 20% (95h) de la durée de séchage, le code donne une valeur à 33,3% près de la valeur identifiée avec la totalité de la durée du processus.

Tab. 1 : Estimation du coefficient de diffusion massique de l'eau liée par analyse inverse en utilisant une partie variable de la cinétique de séchage (HB10) et les erreurs relatives associées.

| Durée (h) | 95 | 190 | 300 | 382 | 478 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| D(m ² /s) | 3,0x10 ⁻¹¹ | 7,4x10 ⁻¹¹ | 6,6x10 ⁻¹¹ | 7,1x10 ⁻¹¹ | 8.0x10 ⁻¹¹ |
| %Num | 62,5 | 7,5 | 17,5 | 11,25 | 0,00 |

Tab. 2 : Estimation de la perméabilité liquide par analyse inverse en utilisant une partie variable de la cinétique de séchage (HB10) et les erreurs relatives associées.

| s | 95 | 190 | 300 | 382 | 478 |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| K _L (m ²) | 5,2x10 ⁻¹⁶ | 4,6x10 ⁻¹⁶ | 5,1x10 ⁻¹⁶ | 4,6x10 ⁻¹⁶ | 3,9x10 ⁻¹⁶ |
| %Num | 33,3 | 17,9 | 30,8 | 17,9 | 0,00 |

Conclusion et perspectives

Dans ce travail, le code *TransPore* a été utilisé pour tenter d'identifier des paramètres de transfert massique par analyse inverse sur des cinétiques de séchage obtenues sur le séchoir semi-industriel de FCBA. L'analyse inverse des coefficients de diffusion de l'eau liée et la perméabilité liquide présentent des différences non négligeables avec les valeurs réelles mesurées en laboratoire sur les mêmes planches suivies lors du séchage. On observe des rapports allant de 2 à 19 pour la perméabilité liquide, et de 2 à 3,3 pour le coefficient de diffusion de l'eau liée. Cette première mise en situation de l'approche développée en laboratoire à l'échelle semi-industrielle montre la difficulté de réunir toutes les conditions nécessaires à cette analyse inverse. Une autre campagne de mesure sera prochainement effectuée à FCBA avec des planches très humides. Le calibrage des sondes résistives sera vérifié et une mesure de l'humidité initiale par double pesée sera ajoutée sur les planches instrumentées. Aussi, il semble nécessaire d'ajouter un autre type de mesure tel que le suivi des contraintes de séchage, le suivi de la cinétique par pesée, pour conforter l'analyse inverse de ces paramètres.

Remerciements

L'ADEME finance le projet de recherche Ossolaire (AAP APRED21) et cofinance une bourse de thèse avec FCBA. Ils sont ici remerciés pour leur soutien.

Références

- Agoua E, Zohoun S, Perré P (2001) A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions: determination of the best fitting method by numerical simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (19): 3231-3744.
- Aléon D (2012) *Séchage des bois d'oeuvre : De la théorie à la pratique / Daniel Aléon (Première édition 2012)*, FCBA.
- Joly P, More-Chevalier F (1980) *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*
- L'Hostis C, Chabagno-Lapie M, Fuente P, Silberberg O (2020) *Guide des solutions de séchage du bois bûche, Rapport de l'étude SOLUSEC*, 40 p.
- Ouertani S, Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2023a) Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation, *Drying technology*. (article en révision).
- Ouertani S, Simo-Tagne M, Rémond R (2023b) Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven central Africa hardwood species. *Wood Material Science and Engineering* 18 (2): 507-516.
- Perré P, Agoua E (2002) Mass transfer in MDF (medium density fiberboard): Identification of structural parameters from permeability and diffusivity measurements. 13th International drying symposium, *Drying*, 178-187.
- Perré P, Pierre F, Casalinho J, Ayouz M (2015). Determination of the mass diffusion coefficient based on the relative humidity measured at the back face of the sample during unsteady regimes. *Drying technology* 33(9): 1068-1075.
- Perré P, Turner I (1999) TransPore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualizing the drying of porous media. *International Journal for Heat and Mass Transfer* (42): 4501–4521.
- Thouraya S, Perre P, Bouali A, Mougel E, Remond R (2017) Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber. *Drying Technology*, 35 (5): 593 - 605.
- Zohoun S, Agoua E, Degan G, Perré P (2003) An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime. *Heat and Mass Transfer* (39) : 147-155.

Etude expérimentale des interactions bois-microorganismes : cas spécifique des immeubles de santé

ESSONO MINTSA Morel¹, PAILHORIES Hélène^{2,3}, AVIAT Florence⁴, LANATA Francesca¹, MICHAUD Franck¹, BELLONCLE Christophe¹

¹ESB, LIMBHA, Nantes, France

²Laboratoire de Bactériologie-Hygiène, Centre Hospitalier Universitaire, Angers, France

³Laboratoire HIFIH, UPRES EA3859, SFR 4208, Université d'Angers, France

⁴Your ResearchH-Bio-Scientific, 307 la Gauterie, Le Landreau, France

morel.essonomintsa@esb-campus.fr

Mots clés : aérosol, bois-microorganismes ; bâtiment de santé ; hygiène ; prélèvements *in situ*

Contexte et objectifs

La construction d'établissements de santé a un impact significatif sur l'environnement, notamment en termes d'utilisation de matériaux et de consommation d'énergie. Par conséquent, la construction durable de tels bâtiments impose l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement pouvant être recyclés et ayant une faible énergie intrinsèque et un faible impact sur l'environnement (Kumari et Kumar 2020, Kotradyová et al. 2014). Le bois constitue assurément une alternative vertueuse à la construction traditionnelle, mais le secteur de la santé offre encore quelques résistances à une utilisation courante.

L'adoption à grande échelle du bois en intérieur dans les bâtiments de santé suscite des réticences à ce jour, car ce matériau est perçu comme peu hygiénique en raison de sa porosité et sa structure organique. La réglementation l'interdit indirectement parce que poreux. Certaines recherches ont pourtant montré que les matériaux bois non traités ont des propriétés antimicrobiennes contre un large éventail d'agents pathogènes responsables des infections associées aux soins de santé (IAS) (Chen et al 2020, Munir et al 2019a, Munir et al 2019b). Toutefois, aucun élément scientifique ne permet aujourd'hui de démontrer que le bois brut présente un avantage sur la survie ou la non-diffusion des microorganismes par contact ou par aérosol. Cependant, son utilisation comme matériau brut est possible moyennant une conception spécifique. Au regard de ce qui précède, des échanges entre l'ESB et le CHU d'Angers ont eu lieu afin d'identifier les leviers permettant d'avancer sur l'utilisation du bois dans les immeubles de santé et d'autres types de bâtiments (établissement scolaires).

L'objectif de ce travail est, non seulement d'étudier le développement/le transfert bactérien via le matériau bois dans le contexte spécifique des établissements de santé, mais aussi de mieux comprendre les interactions bois-microorganismes dans la diffusion ou non des microorganismes. Un programme de recherche visant à étudier l'impact du bois sur le développement bactérien *in situ* et la qualité de l'air (aérosol microbien, particules, composés organiques volatils COV) a été donc défini. Un protocole de mesures a été mis au point en installant des coupons (assemblage de matériaux) dans plusieurs bâtiments de référence. Les données sont collectées régulièrement et l'ensemble des résultats permettra d'avoir une meilleure visibilité quant à l'acceptabilité du bois brut d'un point de vue hygiène dans les établissements de soins.

Matériel et méthode

Etudes in situ

Plusieurs bâtiments, dont certains construits en structure bois, sont utilisés comme modèle d'étude, dans le respect des règlements et de leur utilisation normale. Pour les prélèvements microbiens in situ, des coupons de 10 cm² constitués de 4 matériaux (bois verni, bois non verni, PVC et acier inox) ont été conçus à l'ESB, afin d'être mis en œuvre en plusieurs points dans différents lieux de vie (restaurant, accueil, couloir, bureau, sanitaires, salle repos...) des bâtiments d'étude (Fig. 1).



Fig. 1 : Positionnement des coupons installés dans un établissement de santé et détail du coupon (photos prises par Morel ESSONO)

Dans chaque établissement, un maximum de 8 coupons est prévu à des endroits différents, nommés zones 1 et 2. La zone 1 représente un endroit de l'établissement avec entretien/nettoyage tel que défini par l'établissement (contexte classique de nettoyage) et la zone 2 représente un endroit sans nettoyage et/ou inaccessible. La présence des coupons dans chaque établissement est de 1 mois minimum pour la zone 1. Les échantillons de la zone 2 sont installés pendant un temps plus long afin d'avoir des informations sur les interactions bois-environnement et notamment le développement possible de biofilm. Parallèlement, une vérification de l'état des surfaces de chaque matériau a été effectuée à partir d'un prélèvement par boîtes contact à J₀, J₁₅ et J₃₀. Après chaque prélèvement, les souches microbiennes sont soigneusement conservées, puis identifiées au CHU d'Angers à l'aide d'un appareil de type VITEK MS de bioMérieux. Toutefois, l'accès et le prélèvement doivent être au préalable définis avec l'établissement.

Etudes avec un aérosol bactérien

Une approche proposant un aérosol sec comme mode de contamination a été développée pour mieux comprendre les interactions entre les microorganismes et le matériau bois. Ainsi, un système expérimental nommé « chambre statique » a été conçu, permettant de distribuer un flux d'air microbien depuis une culture liquide, vers l'intérieur du système expérimental (Fig. 2).

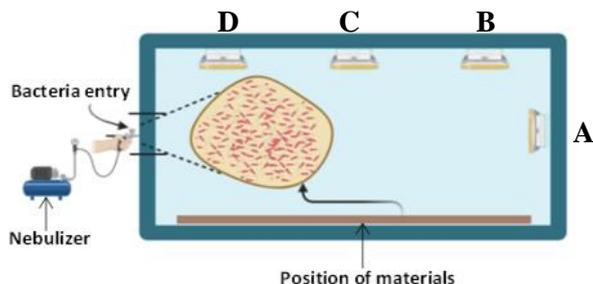


Fig. 2 : Schéma du dispositif expérimental (créé par Morel Essono avec [Biorender.com](https://www.biorender.com))

Les microorganismes sont par la suite suspendus sur les géloses (A, B, C et D) et pourront être dénombrés en présence et absence de différents matériaux parmi lesquels le PVC, le bois verni,

le bois non verni et l'Acier Inox. Le but ici est d'observer l'influence des matériaux sur la diffusion du nuage bactérien.

Premiers résultats

Prélèvements in situ

La tendance des premiers résultats montre que le bois non verni possède une meilleure activité sur la régulation de la croissance microbienne à J₃₀, contrairement à d'autres matériaux (Fig. 3). L'idéal sera d'étendre le suivi afin d'observer la conservation ou non de cette capacité de régulation de la diffusion de microorganismes dans un contexte classique de nettoyage. Parallèlement, une identification du type de microorganismes détectés sur chaque type de matériau a été réalisée (Tab. 1). A terme, ces résultats permettront d'avoir une image claire des possibilités d'utilisation du bois brut dans ces structures et de son impact sur la qualité de l'air.

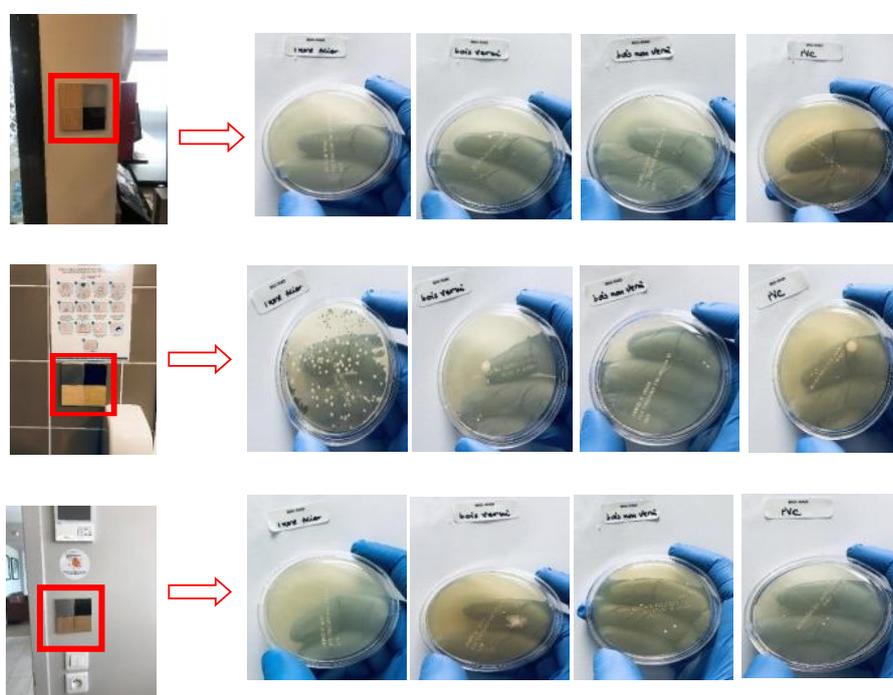


Fig. 3 : Prélèvements *in situ* par boîtes contact

Etat des surfaces après aérosolisation

La récupération des unités formant des colonies (UFC) sur les différents matériaux montre que le polystyrène (PS) retient plus de bactéries à la surface à J₀, J₁ et J₂, par rapport au chêne et au polypropylène (PP). Les microorganismes présents à la surface du bois diminuent considérablement à partir de J₁, ce résultat traduit une forte inhibition de la croissance bactérienne à la surface du bois, contrairement au PP et PS (Fig. 4). Ce phénomène a été déjà observé par Vainio-Kaila et al (2011) qui ont montré que les unités formant des colonies (UFC) de *E. coli* et *L. monocytogenes* non seulement diminuaient plus rapidement sur le bois de cœur du pin que sur le verre, mais aussi, n'augmentaient pas le lendemain. En effet, la limite minimale détectable (LDM) du *S. aureus* sur le chêne a été atteinte entre 0 et 2 jours alors que cette limite n'a pas été atteinte pour les deux autres matériaux sur le même intervalle de temps (Fig. 4). Ce résultat est similaire à celui obtenu par Chen et al (2020) qui ont montré que la LDM de *E. faecalis*, *K. pneumoniae* et *S. aureus* sur le chêne était compris entre 0 et 2 jours et que cette limite était de plus de 15 jours s'agissant des autres matériaux testés. Le même résultat a été

obtenu par Milling et al (2005) qui ont montré qu'après 48 h, aucune bactérie cultivable n'a été détectée sur le chêne, et que la première réduction du nombre de bactéries sur le plastique a commencé 4 jours après l'inoculation et n'a abouti qu'à une réduction de log 2 après 7 jours. Les auteurs ajoutent le fait qu'aucune diminution de bactéries *E. faecium* n'a été observée sur le plastique, au contraire, les bactéries à gram-positif ont pu être récupérées à des niveaux très élevés de plus de 10⁴ UFC par gramme de copeaux de polystyrène après 7 jours (Milling et al 2005).

Tab. 1 : Identification des bactéries sur les matériaux à J30

| Bactéries identifiées | Zones de prélèvements | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | PASA | | | | Sanitaires | | | | Salle repas | | | | Bureau Directrice | | | | Accueil | | | |
| Prélèvements à J30 | BV | BNV | PVC | AC | BV | BNV | PVC | AC | BV | BNV | PVC | AC | BV | BNV | PVC | AC | BV | BNV | PVC | AC |
| <i>S. epidermis</i> | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | ✓ |
| <i>S. Haemolyticus</i> | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | |
| <i>Priestia megaterium</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| <i>Staphylococcus sp.</i> | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | |
| <i>Bacillus sp.</i> | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | | | |
| <i>Micrococcus luteus</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ |
| <i>S. hominis</i> | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>S. capitis</i> | | | | ✓ | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Bacillus licheniformis</i> | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Lysinibacillus fusiformis</i> | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | |
| <i>S. saprophyticus</i> | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Brevibacillus sp.</i> | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>S. warneri</i> | | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | |
| <i>Enterococcus faecium</i> | | | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Total bactérie id/zone à J30 | 2 | 0 | 4 | 1 | 5 | 0 | 3 | 3 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 |

BV = bois verni, BNV = bois non verni, PVC = polychlorure de vinyle, AC = acier inox

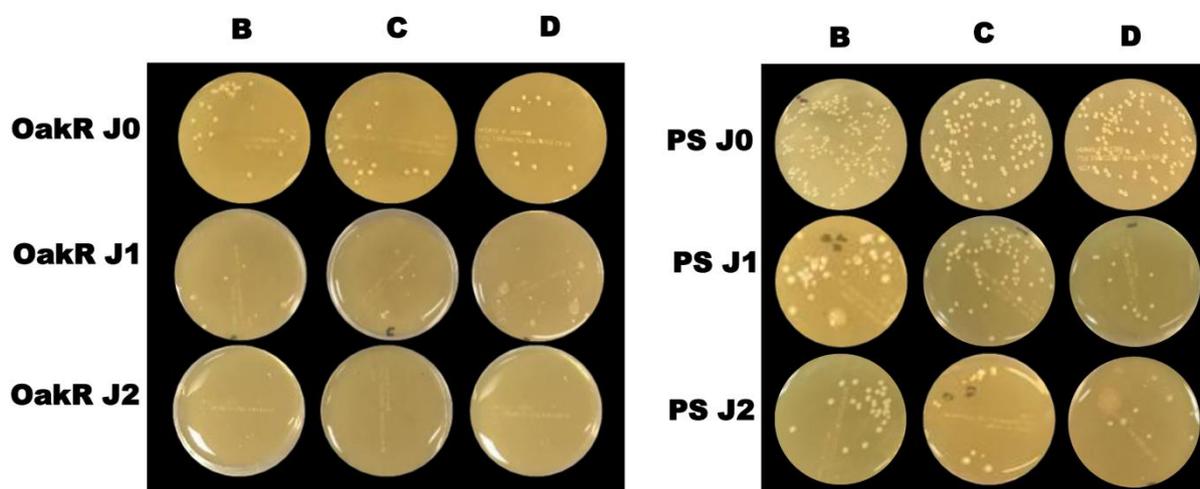


Fig. 4 : Récupération de l'aérosol bactérien à la surface des matériaux poreux, aux différentes positions (Fig. 2) : Bois (à gauche) et PS (à droite)

Conclusion partielle

Cette étude souligne la grande capacité d'inhibition de croissance bactérienne sur le bois brut de chêne. Des études complémentaires sont en cours pour mieux comprendre les mécanismes physiques et chimiques impliqués dans les interactions bois-microorganismes. Nos résultats préliminaires sont également encourageants concernant l'utilisation du chêne dans la construction ou décoration intérieure des établissements de santé.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à l'Agence Nationale de Recherche (ANR), au Groupe KORIAN, au CHU d'Angers et à l'ESB de Nantes.

Références

Chen J-C, Munir MT, Aviat F, Lepelletier D, Le Pape P, Dubreil L, Irle M, Federighi M, Belloncle C, Eveillard M (2020) Survival of Bacterial Strains on Wood (*Quercus Petraea*) Compared to Polycarbonate, Aluminum and Stainless Steel. *Antibiotics*, 9:804.

Kotradýová V, Kali Náková B (2014) Wood as Material Suitable for Healthcare and Therapeutic Facilities. *Adv. Mater. Res.* 1041:362–366.

Kumari S, Kumar R (2020) Green Hospital—A Necessity and Not Option. *J. Manag. Res. Anal.* 7:46–51.

Milling A, Smalla K, Kehr R, Wulf A. The use of wood in practice – a hygienic risk? *Holz Als Roh- Werkst.* 63(6):463-72.

Munir MT, Aviat F, Pailhories H, Eveillard M, Irle M, Federighi M, Belloncle C (2019b) Direct Screening Method to Assess Antimicrobial Behavior of Untreated Wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 77:319–322.

Munir MT, Pailhoriès H, Eveillard M, Aviat F, Lepelletier D, Belloncle C, Federighi MM (2019a) Antimicrobial Characteristics of Untreated Wood: Towards a Hygienic Environment. *Health (N.Y.)*, 11:152.

Vainio-Kaila T, Kyyhkynen A, Viitaniemi P, Siitonen A (2011) Pine heartwood and glass surfaces: easy method to test the fate of bacterial contamination. *Eur J Wood Wood Prod.* 69(3):391-5.

EVIBOIS: Monitoring of the Vibratory Behaviour of Tall Timber Building

JANOT Dorian¹, VIEUX-CHAMPAGNE Florent¹, GUEGUEN Philippe²,
BOUDAUD Clément³

¹Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS, 3SR, F-38000, Grenoble France

²ISTerre, Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, IRD, Université
Gustave Eiffel, Grenoble, France

³ESB, LIMBHA, Nantes, France

clement.boudaud@esb-campus.fr

Key words: High-rise timber building; Vibratory behaviour; Operational Modal Analysis; Continuous monitoring

Context and objectives

State of the art

Structural health monitoring (SHM) is facing several scientific issues related to (1) the building specific response for normally equivalent buildings, (2) paucity of experimental data in normal and abnormal condition, and (3) the operational and environmental conditions effects. Timber constructions are lighter and less stiff than conventional buildings (e.g., steel or reinforced concrete buildings), resulting in a different behaviour about horizontal vibrations (Ostman and Kallsner 2011) and (Schmidt et al. 2018). For timber constructions, since the development is recent, experimental testing is necessary to better understand the behaviour (Abrahamsen et al. 2020). Feldmann et al. (2016) showed differences in modal behaviour between normally equivalent timber building (e.g., solid timber with concrete core, timber frame with timber core and timber frame with concrete core). Most of the studies are punctual measures (Reynolds et al. 2015) and do not take into account long term, seasonal and/or daily effects. Abrahamsen et al. (2020) showed that wind leads to risks for comfort of final users in tall timber buildings. The EVIBOIS project aims at improving our understanding of the dynamical behaviour of high-rise timber construction, by studying the case of CLT building with no concrete core, located in Grenoble, France.



Fig. 1 : The “Haut-Bois”, R+8 (left), concrete stairwell (middle), R+5 (right)

Studied building: 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). There is no concrete core in the buildings. Current storeys are made of Cross Laminated Timber (CLT) for shear

walls and floors, Glulam (GL24h) for beams and some I-section steel beams. Each timber building is dynamically separated from the concrete stairwell by seismic expansion joints.

Methods

Data acquisition

A semi-permanent monitoring (still going after 20 months) is installed at the top of building, it's composed of three velocimeters Lennartz 3D-5s. A full-scale measure is also performed to define a reference for the modal identification. The concrete stairwell is also measured once to understand the transmission of vibrations through the building and the stairwell. A weather station Vantage Pro 2 Davis Instruments is installed next to the "Haut-Bois" to register ambient temperature, wind speed, wind direction and ambient relative humidity.

Analysis methods

Two methods are used to analyse the time series: FDD for modal analysis (modal shapes and natural frequencies) and RDT for damping (Reynolds et al. 2016).

Results and discussion

Results presents the vibratory behaviour of the building and its variations over time. Three modes are clearly identified at frequencies $f_{E1} = 1.88$ Hz, $f_{N1} = 2.46$ Hz and $f_{Z1} = 2.76$ Hz. The analysis of the mode shapes shows that the first mode is flexion on the axis East, the second mode is flexion on the axis North and third mode is torsion around the Z axis (Fig. 2).

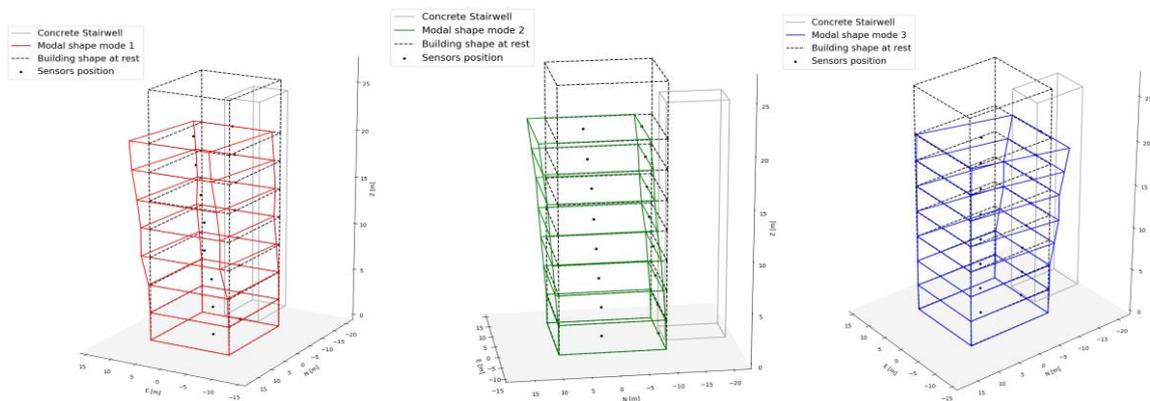


Fig. 2 : Modal shapes of the 8 storeys timber building

Fig. 3 shows the evolution of the fundamental frequency, the relative humidity, the temperature and the wind velocity over the first year of occupancy. Many analysis can be derived from these data, some will be presented in the poster, such as observing the evolution of one modal frequency in respect to the temperature (Fig. 4) or in respect to the relative humidity (Fig. 5).

Also, these data can be used to identify how much each environmental variable command the dynamic behaviour of the structure. A multilinear regression is used to calculate the partial coefficients α , β , γ and ε (error) that provide the best assessment of the fundamental frequency f_1 , based on the temperature T , the Relative Humidity RH , the wind velocity W and the initial fundamental frequency f_{1_0} :

$$f_1 = \alpha T + \beta RH + \gamma W + f_{1_0} + \varepsilon \quad (1)$$

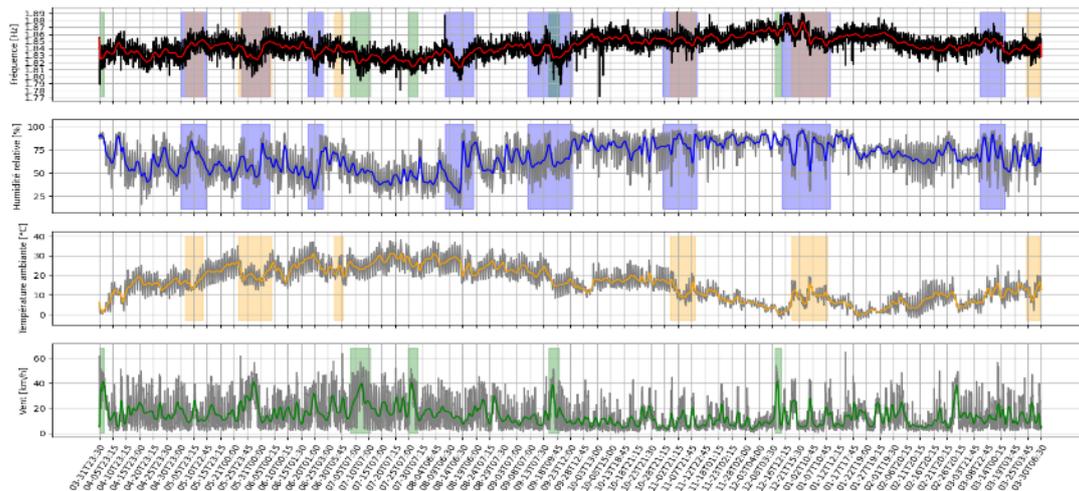


Fig. 3 : Evolution of the modal parameters and environmental data over time. Black or grey line represent the value over a window of 1 hour, the colored lines represent the moving average value over 24h.

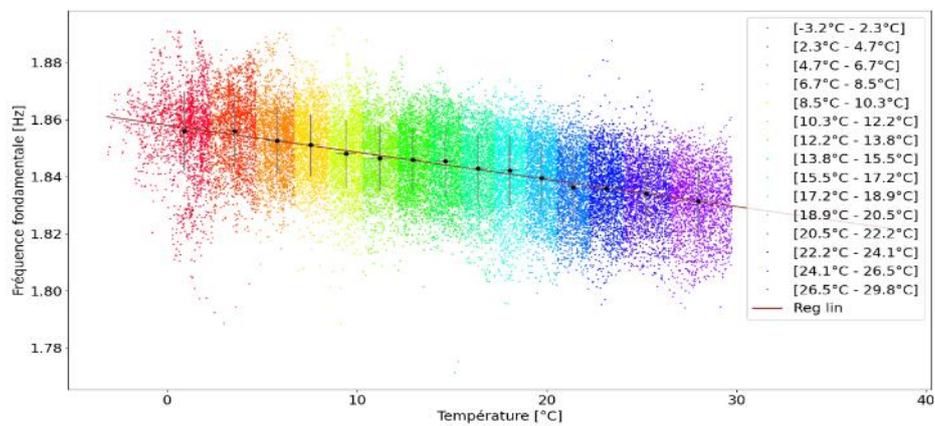


Fig. 4 : Fundamental frequency versus temperature. Colored dots are the frequency (over 1 hour of observation), each color represent a range (15 quantiles) of temperatures. Black dots are the average value of a temperature range (grey lines are the standard deviation). The linear regression of the black dots is also displayed.

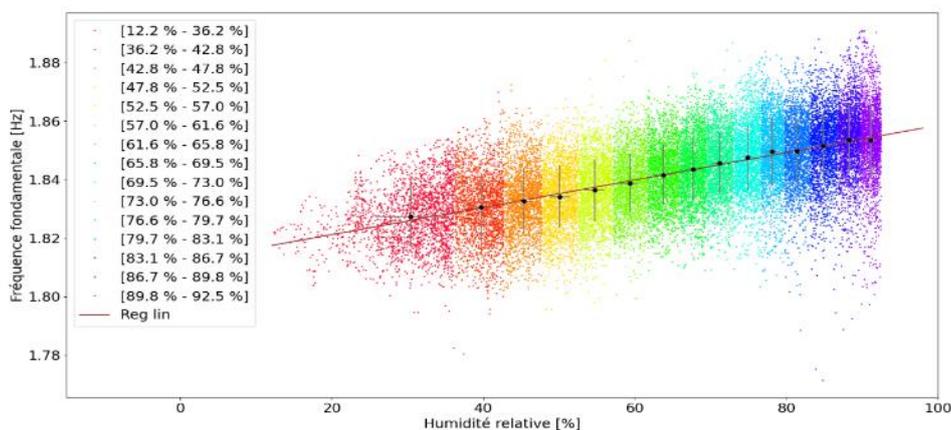


Fig. 5 : Fundamental frequency versus relative humidity. Colored dots are the frequency (over 1 hour of observation), each color represent a range (15 quantiles) of relative humidity. Black dots are the average value of a relative humidity range (grey lines are the standard deviation). The linear regression of the black dots is also displayed.

Fig. 6 presents the comparison between the modeled fundamental frequency (blue curve) and the measured one (red curve). The global trends of the curves are similar and most of the variations are described. This approach is currently being developed for other dynamical properties, such as modal dampings and modal strain energies.

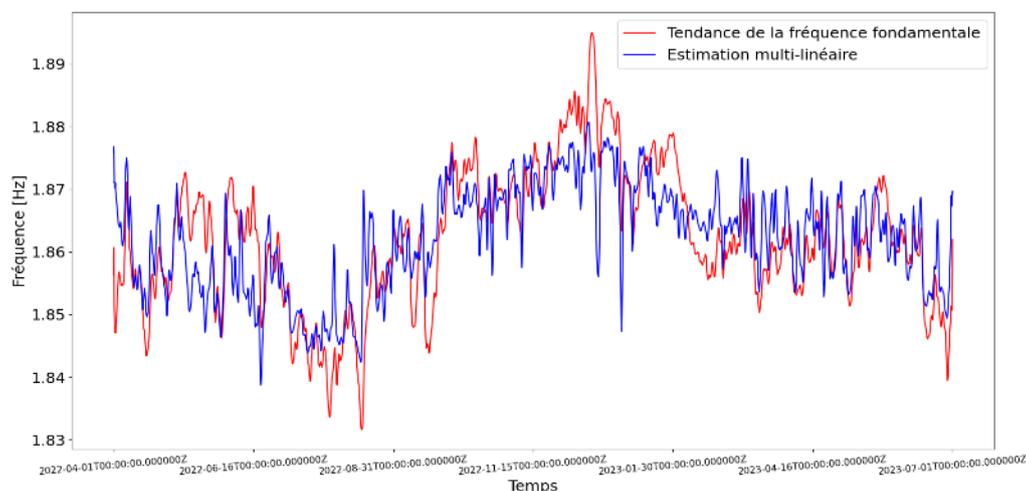


Fig. 6 : Estimation of fundamental frequency using environmental multilinear model

Conclusion

The specificity of this project is the vibrational monitoring of a 8 storey timber building by continuous measurement over a long period of time (20 months so far). Combined with environmental measurements, the evolution of the dynamic parameters can be observed and correlation between environmental phenomenon and these evolution can be studied. Based on a multilinear regression, the current work aims at ranking the environmental contributing factors of the dynamic properties evolutions.

One outlook is to study the link between these dynamic properties and user's comfort. For example in studying in more detail the damping (as it is a major mitigating factor in vibration discomfort and in-situ measurements are relatively rare). Another example is to compare the analytical method of Eurocode 1 (2010) to determine the maximal characteristic acceleration to the measured one and the threshold proposed in ISO 10137 (2007).

Acknowledgements

The financial support provided by IRGA (Univ. Grenoble Alpes) is gratefully acknowledged. Thanks to Actis for the agreement-in-principle for letting us to study the building.

References

Abrahamsen R, Bjertnaes M.A, Bouillot J, Brank B, Cabaton L, Crocetti R, Flamand O, Garains F, Gavric I, Germain O, et al. (2020) Dynamic response of tall timber buildings under service load: The dynaTTB research program, in: EUROODYN 2020, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 22–24 June 2020, National Technical University of Athens. pp. 4900–4910.

Eurocode 1 (2010) NF EN 1991-1-4 Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions, CEN.

Feldmann A, Huang H, Chang W, Harris R, Dietsch P, Grafe M, Hein C (2016) Dynamic properties of tall timber structures under wind-induced vibration, in: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016).

ISO 10137 (2007) Base for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, International Standard.

Ostman B, Kallsner B (2011) National building regulations in relation to multi-storey wooden buildings in Europe. SP Tratek and Vaxjo University, Sweden.

Reynolds T, Harris R, Chang W.S, Bregulla J, Bawcombe J (2015) Ambient vibration tests of a cross-laminated timber building. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials 168, 121–131.

Reynolds T, Casagrande D, Tomasi R (2016) Comparison of multi-storey cross-laminated timber and timber frame buildings by in situ modal analysis. Construction and building materials 102, 1009–1017.

Schmidt E.L, Riggio M, Laleicke P.F, Barbosa A.R, Van Den Wymelenberg K (2018) How monitoring CLT buildings can remove market barriers and support designers in north America: an introduction to preliminary environmental studies. Portuguese Journal of Structural Engineering, 41–48.

Conception et développement de structures écologiques à architecture contrôlée à base de mycélium

FIGEL Laura¹, AGUILAR Kyle¹, SAKER Safwan², BESSERER Arnaud¹, BROSSE Nicolas¹

¹ Université de Lorraine, LERMAB, France

² CRITT, 27 rue Philippe Séguin, 8000 Épinal, France

laura.figel@univ-lorraine.fr

Mots clés : bois ; champignon ; mycocomposite ; mycélium ; stratoconception

Contexte et objectifs

Le secteur du bâtiment représente 23 % des émissions de CO₂ pour la France (Ministères Écologie Énergie Territoires, 2022). En vue d'atteindre les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2030, un changement de paradigme dans le secteur du bâtiment est indispensable. Dans le cadre d'une transition énergétique soutenable, l'isolation thermique des bâtiments est actuellement au cœur des préoccupations. Cependant, les isolants actuels sont majoritairement d'origine fossile et leur empreinte carbone est très négative. Des solutions biosourcées comme la laine de bois ou la ouate de cellulose sont disponibles à l'échelle industrielle et sont en plein développement. En parallèle les possibilités offertes par le numérique et la robotique révolutionnent la conception des bâtiments. Cela se traduit par l'apparition de parois aux formes complexes et non standardisées qui ne permettent pas l'utilisation optimale des matériaux isolants disponibles sur le marché. Enfin, la préoccupation incendie et particulièrement la propagation des feux couvant dans les parois constitue un défi pour la construction bois et biosourcée. Les nouveaux usages des bâtiments combinés aux tensions sur les matières premières et à l'urgence climatique imposent le développement de nouveaux produits. Le projet présenté ici vise à concevoir et développer un matériau isolant innovant à base de lignocellulose dont la cohésion est assurée par des hyphes de champignons filamenteux : le mycocomposite. Un tel isolant présente l'avantage d'être biosourcé, biodégradable, ignifugé et surtout de s'inscrire dans une perspective d'économie circulaire et de transition écologique et énergétique (Elsacker et al. 2020, Fairus et al. 2022). Les mycocomposites développés seront utilisés pour remplir des structures en bois alvéolaires fabriquées en stratoconception®. Le procédé de stratoconception® est une addition de couches de bois usinées pour reconstituer un objet de forme complexe (Frécharde et Meyer 2022). Le matériau mycocomposite ayant la capacité de progresser et d'occuper la totalité d'un espace creux tout en restant solide, associé à la stratoconception®, ce matériau innovant permettra aux architectes d'envisager de nouveaux modes de conception et de fabrication en limitant fortement la production de déchets.

Matériels et méthodes

Matériau bois

Les panneaux de bois seront usinés selon la méthode de stratoconception (Fig 1). Les coproduits d'usinage (sciure, particules, chutes, ...) sont utilisés pour la production du matériau isolant mycocomposite dans une logique de zéro déchet. Un scénario feuillu et un scénario résineux sera envisagé.

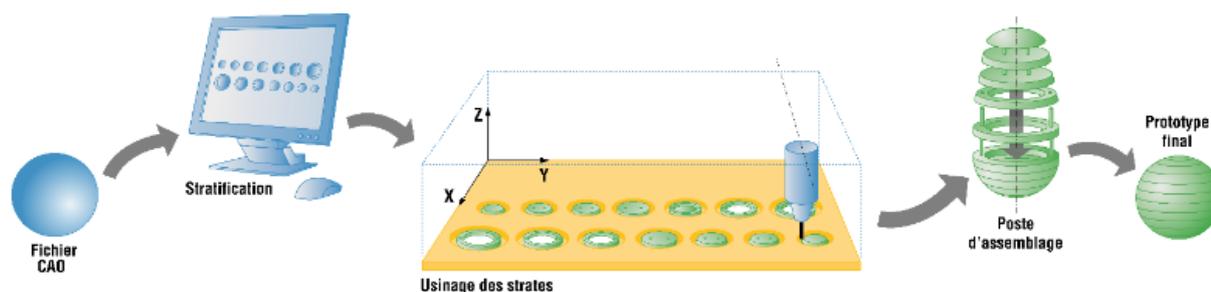


Fig 1 : Principe du procédé breveté de Stratoconception® (Fréchard *et al.*, 2022).

Production de mycocomposites

La méthode de production des mycocomposites à partir de bois est réalisée selon le procédé développé dans le cadre du projet Profex (Aguilar *et al.*, sous presse). Il comprend trois étapes (Fig. 2). Le bois est d'abord prétraité et fonctionnalisé pour maximiser son interaction avec le champignon. En parallèle une culture liquide du champignon *Trametes versicolor* est réalisée dans le milieu malt 2 %. La deuxième étape consiste à ensemercer les pellets dans la biomasse pendant 2 semaines à 28 °C et 60 % RH. Le mélange obtenu est appelé la pré-culture solide. Le champignon va coloniser et assimiler partiellement et de manière hétérogène la biomasse bois humide. Cette pré-culture est ensuite utilisée pour former le mycocomposite. La croissance du champignon est ensuite stoppée facilement (par chauffage à 50°C, pulvérisation H₂O₂ ou micro-ondes).

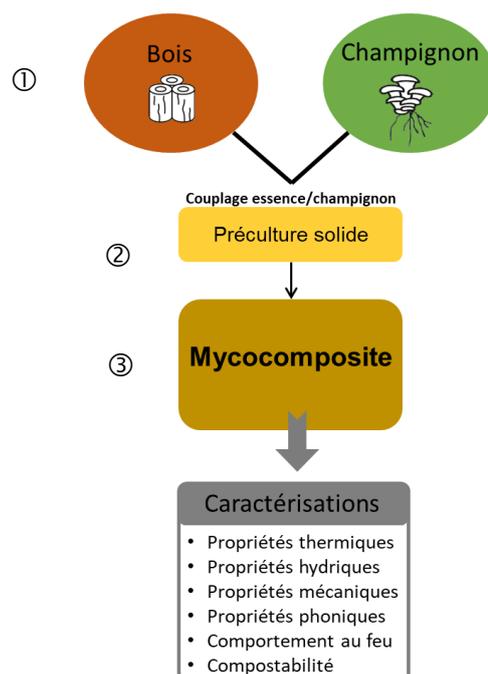


Fig. 2 : Etape de fabrication des mycocomposites, ① Prétraitement de la biomasse hêtre et culture liquide de *T. versicolor* en bioréacteur, ② couplage essence/champignon et ③ conception puis caractérisations du mycocomposite.

Caractérisation de mycocomposites

Les mycocomposites ont été broyés avec un broyeur cryogénique CryoMill Retsch. Ils ont ensuite été marqués avec le fluorochrome WGA-Alexa 488 (Thermo Fischer) puis caractérisés au microscope optique Leica DM2700 M, filtres L5 (lex BP 480/40 et lex BP 527/30) et N2.1 (lex 515-560 et lex 590). Les mycocomposites ont été métallisés Or/palladium 4.8 Å puis observés au microscope électronique à balayage (MEB) Jeol IT200.

Résultats et discussion

Chaque étape de production du mycocomposite doit être optimisée pour obtenir le matériau innovant désiré. Nous cherchons dans un premier temps à répondre à diverses questions liées à la croissance fongique au sein même du mycocomposite. En effet, l'objectif est d'obtenir un matériau avec une colonisation fongique la plus homogène possible. Cette phase nécessite de pouvoir visualiser le champignon au sein du matériau. Les premières observations réalisées par microscopie fluorescence sur le système modèle hêtre/ *T. versicolor* montrent que le mycélium était bien incorporé aux particules de bois (Fig. 3) et constitue un réseau d'hyphe dense.

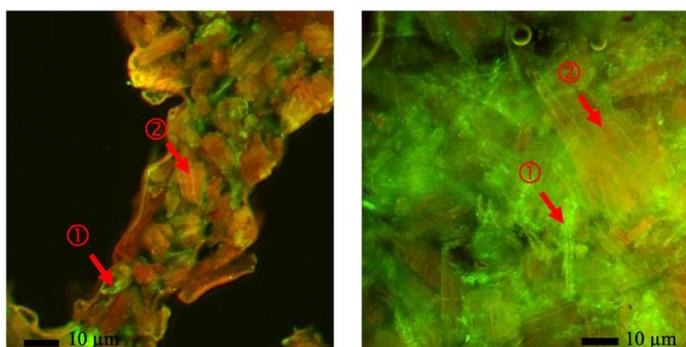


Fig. 3 : Observation en microscopie fluorescence de myco-composites. En vert ① le champignon (WGA-AlexaFluor 488) et en rouge ② les particules de bois (auto-fluorescence).

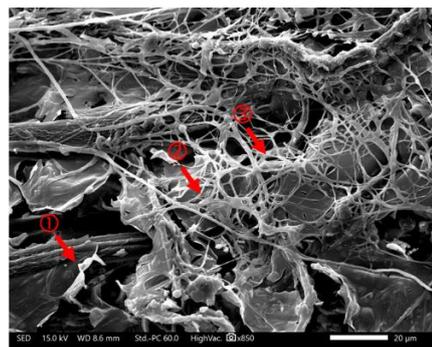


Fig. 4 : Observation MEB d'un myco-composite hêtre/*T. versicolor*, ① biomasse hêtre, ② mycélium de *T. versicolor* et ③ vide.

En corrélant la microscopie à fluorescence au MEB, nous pouvons visualiser comment les hyphes s'entremêlent dans les particules de bois (Fig. 4). Les étapes suivantes viseront à caractériser la densité de remplissage du mycélium et à étudier comment les différents prétraitements modifient les interactions bois-champignon et aboutissent à des matériaux myco-composites qui répondent au cahier des charges.

Une fois les conditions de fabrications des myco-composites optimisées, différents types de caractérisations et d'optimisations du myco-composite sont envisagées (Tab. 1).

Tab. 1 : Liste de caractérisations des myco-composites et outils envisagés.

| Caractérisations | Outils envisagés |
|------------------------------------|--|
| Propriétés physiques et thermiques | <ul style="list-style-type: none"> • Isotherme de sorption et hystérésis • Retrait/gonflement • Coefficient de diffusion massique • Porosité/ perméabilité • Tortuosité |
| Propriétés mécaniques | <ul style="list-style-type: none"> • Tests de traction • Tests de gonflement |
| Propriétés acoustiques/ phoniques | Propagation d'ondes |
| Comportement au feu | Cône calorimètre de combustion, panneau radiant |
| Compostabilité | Test gravimétrique sur longue durée (Zimele <i>et al.</i> , 2020) |
| Hygroscopique | Régulation de l'humidité intérieur |

Ces caractérisations nous permettront d'optimiser la ou les condition(s) idéale(s) de fabrication des myco-composites. Par exemple, des premiers essais en traction ont montré que le prétraitement de la biomasse influe fortement sur les propriétés mécaniques (Fig. 5).

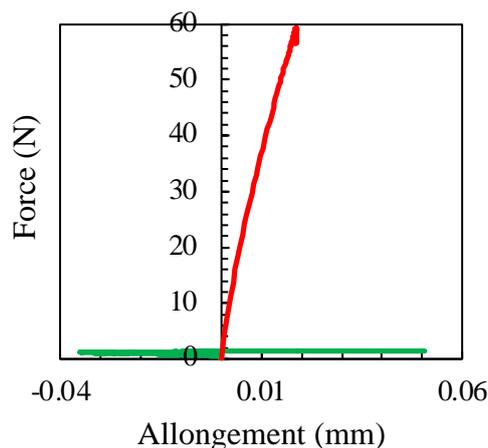


Fig. 5 : Caractérisation d'un mycocomposite sans prétraitement de la biomasse hêtre (vert) et avec prétraitement (rouge).

Conclusion et perspectives

À terme, ce projet permettra de développer des isolants semi-rigides d'épaisseur variable et destinés à remplir *intra-muros* de grandes alvéoles lors du processus de fabrication des murs. Pour y parvenir, plusieurs verrous sont à lever, notamment trouver les conditions idéales pour la croissance fongique ainsi que pour le prétraitement de la biomasse. Nous devons également savoir comment le mycélium se développe dans les particules de bois.

Références

- Elsacker E., Vandeloock S., Van Wylic A., Ruytinx, J., De Laet L., Peeters E. (2020) A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of The Total Environment*, 725, 138431.
- Fairus M.J.B.M., Bahrin E.K., Arbaain E.N.N., Ramli, Enis N. (2022) Mycelium-based composite: A way forward for renewable material. *J. Sustain. Sci. Manag*, 17, 271-280.
- Frécharde V., Bléron L., Meyer J. (2021) Proposition d'une méthode de conception-fabrication pour l'architecture en bois. Application du procédé de Stratoconception®. In 10^{èmes} Journées Annuelles du GDR3544 Sciences du Bois, 17-19 novembre 2021, Montpellier, pp. 101-104.
- Ministère Écologie Énergie Territoires (2022) Construction et performance environnementale du bâtiment, [ecologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr). Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment> (Consulté le 06 Novembre 2023).
- Ziegler-Devin I., Chrusciel L., Brosse N. (2021) Steam explosion pretreatment of lignocellulosic biomass: a mini-review of theoretical and experimental approaches. *Frontiers in Chemistry*, 9, 705358.
- Zimele Z., Irbe I., Grinins J., Bikovens O., Verovkins A., Bajare D. (2020) Novel mycelium-based biocomposites (Mbb) as building materials. *Journal of Renewable Materials*, 8(9), 1067-1076.

Variabilité de l'aubier et de la nodosité d'épicéa commun, de sapin pectiné et de pin sylvestre

RAVOAJANAHARY Tojo^{1,3,4}, DAQUITAINE Renaud¹, URSELLA Enrico²,
REMOND Romain³, LEBAN Jean-Michel⁴

¹ Groupe SIAT, ² MiCROTEC, ³ LERMAB Enstib-UL, ⁴ BEF-INRAE
tojo.ravoajanahary@groupesiat.fr

Mots clés : aubier ; duramen ; nodosité ; construction ; durabilité

L'évaluation de la qualité en bois des ressources forestières est une préoccupation commune aux gestionnaires forestiers et aux acteurs de la première transformation.

Pour les gestionnaires, les questions qui se posent portent sur les conséquences d'opérations sylvicoles, comme la densité de plantation et les scénarios d'éclaircies, sur les caractéristiques morphologiques des arbres sur pied et sur les propriétés de leur bois (Leban et al. 1991, Houiller et al. 1995, Leban 1995).

Les acheteurs de bois doivent évaluer la qualité des arbres sur pied sur la base des dimensions et de la forme des troncs, la longueur sans branches des troncs, la hauteur du houppier, le diamètre des branches et leur état sanitaire. Il s'agit d'estimer au mieux les volumes de bois sans nœuds, avec des nœuds noirs ou adhérents. En effet les sciages seront caractérisés notamment par leur nodosité, ce qui permet de les classer et donc de leur conférer une valeur, qui varie en fonction des usages qu'il s'agisse de la menuiserie, de la charpente ou bien de l'emballage.

La proportion de bois de cœur et d'aubier est également un indicateur important de la qualité des produits finaux notamment l'aspect visuel. En effet pour des essences comme les pins et le douglas le duramen est coloré alors qu'il ne l'est pas pour le sapin pectiné et les épicéas. Pour toutes ces essences la teneur en eau est en général plus élevée dans l'aubier que dans le duramen, ce qui impacte les modalités de séchage et les fissurations qui en résultent. La proportion de bois de cœur et d'aubier est une caractéristique difficile à quantifier sur les arbres en forêt.

L'analyse des variations de ces différents indicateurs de la qualité a fait l'objet de travaux basés sur la modélisation conjointe de la croissance des arbres et de la qualité de leur bois (Leban et al. 1995, Saint-André et al. 1997, 2000, Daquitaine 2003, Achim et al. 2006). Pour des raisons matérielles, de temps et de coûts, les modèles mis en œuvre ont été ajustés sur des mesures destructives d'un nombre limité d'arbres (entre 30 et 100), ce qui en limite la portée en termes de description de la variabilité.

Aujourd'hui, la mise en œuvre par quelques scieries de scanners tomographiques RX permet la mesure exhaustive en continu des indicateurs de qualité de tous les billons qui seront sciés (Rais et al. 2017). C'est un changement de paradigme pour l'analyse des différentes sources de variabilité des indicateurs de qualité des bois.

A la différence des travaux antérieurs basés sur des échantillons de petite taille, nous avons aujourd'hui la possibilité de constituer des jeux de données de plusieurs dizaines de milliers de billons, chacun étant caractérisé de manière exhaustive en termes de nombre, dimension et état sanitaire des nœuds, de caractéristiques géométriques, de proportion d'aubier, de poches de résines, de largeur de cerne etc.

Nous avons donc mis en œuvre les procédures pour la constitution d'une base de données issue des mesures du scanner tomographique RX réalisées pendant un mois de production.

Les principaux résultats préliminaires qui seront présentés portent sur (i) la caractérisation de la variabilité de la proportion d'aubier et de la nodosité pour trois essences forestières abondantes dans le Nord-Est de la France, l'épicéa commun, le sapin pectiné et le pin sylvestre et sur (ii) la mise en relation des variations de ces indicateurs avec les dimensions de grumes et billons.

Nous montrerons comment ces relations pourront être exploitées pour mieux sélectionner en forêt les peuplements permettant l'obtention des qualités de sciages qui sont commandés par les clients de la scierie.

Nous présenterons ensuite les perspectives qui découlent de ces travaux notamment en particulier la qualité des gros bois.

Références

Achim A, Gardiner B, Leban JM, Daquitaine R (2006). Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 36, 246–264.

Daquitaine R (2003). Evaluation des chaînes de modèles de production ligneuse. Prédiction de la qualité des produits d'une ressource forestière sur pied en Epicéa commun (*Picea abies* Karst). Doctorat de l'ENGREF, option Sciences forestières et du bois.

Houllier F., Leban JM, Colin, F (1995) Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 74(1–3), 91–102. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03510-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03510-4)

Leban JM (1995) Estimations des propriétés des sciages d'une ressource forestière : application à l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.). *Revue Forestière Française*, 48, 131–140.

Leban JM, Daquitaine R., Saint Andre L. (1996) WinEpifn - un logiciel d'évaluation de la qualité de la ressource en bois applique au douglas. *Forêt-Entreprise*, 11–15.

Leban JM, Houllier F, Goy B, Colin F (1991) La qualité du bois d'épicéa commun en liaison avec les conditions de croissance. *Forêt-Entreprise*, 13-27.

Rais A, Ursella E, Vicario E, & Giudiceandrea F (2017). The use of the first industrial X-ray CT scanner increases the lumber recovery value: case study on visually strength-graded Douglas-fir timber. *Annals of Forest Science*, 74(2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0630-5>

Saint-Andre L, Leban JM, Daquitaine R, & Houllier F (1997). Linking models for the tree growth and wood quality in Norway spruce *Picea abies*. Part II: Assessment of a regional resource for wood industry supply. IUFRO WP S5.01-04. Proceedings, Second Workshop: Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software, Berg-En-Dal, Kruger National Park, South Africa, August 26-31, 1996., 229–236.

Saint-Andre L, Leban JM (2000). An elliptical model for tree ring shape in transverse section. Methodology and case study on Norway Spruce. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 58, 368–374. <https://doi.org/10.1007/s001070050447>

Saint-Andre L, Herve JC, & Leban JM. (2000). Modelling the number of rings in individual logs of Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15, 135–143.

Innovative particleboards made of chemically modified sugarcane bagasse. Biological durability evaluation

AHMADI Peyman^{1,2,3}, EFHAMISISI Davood¹, THEVENON Marie-France^{2,3},
ZAREA HOSSEINABADI Hamid¹, OLADI Reza¹, GERARD Jean^{2,3}

¹Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources,
University of Tehran, Iran

²CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France

³BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
marie-france.thevenon@cirad.fr

Keywords: Bagasse waste; tannin; furfural; resin; particleboard; durability; fungus; termite

Context and objectives

Wood is an anisotropic material, mainly consisting of cellulose, hemicellulose and lignin (Zhang et al. 2022) and as a result, wood is susceptible to dimensional changes caused by moisture in service situation, which severely limits its usage in various applications (Sargent 2019). Wood-based composites are manufactured in desirable sizes that offer increased dimensional stability and homogeneity, making them viable substitutes for solid wood in end-uses. Wood composites reduce some of the difficulties associated with water absorption and dimensional instability in wood and do not have the drawbacks of solid wood (Baileys et al. 2003). Since the implementation of the "Forest breathing plan" prohibiting wood exploitation in Iran, difficulties in supplying for particleboard production have pushed producers to investigate for alternatives (Gilanipoor et al. 2021). Meanwhile, waste sugarcane bagasse, widely available in Iran, offers a sustainable and environmentally friendly way to supply this vast need (Berndt and Hodzic 2007). Most of this lignocellulosic waste is either burned as fuel or sent to landfills (Kiatkittipong et al. 2009). Using bagasse as a raw material for particleboard is an affordable way to repurpose this resource while compensating for the panel industry's scarcity of wood. Nevertheless, the problems related to durability and disadvantages related to moisture absorption remain (Kusumah et al. 2016), especially when the composite consists of species with low inherent natural durability, such as bagasse. Therefore, in order to upgrade their performance, protection systems that will not reduce the mechanico-physical properties and will comply with gluing abilities are required (Reinprecht 2016). Furfurylation is an environmentally friendly method that has attracted much attention today, notably as a wood protection method (Lande et al. 2008). The purpose of this research was (i) to impregnate bagasse particles with suitable tannin-furfural resins (TFu), (ii) to bind modified bagasse with tannin-based adhesives to produce environmentally friendly bagasse particleboards. In the first phase, a natural resin based on tannin and furfural was synthesized under different conditions and proportions of furfural according to Ahmadi et al (2022). In the second phase, particleboards were produced from the treated bagasse particles, and their biological properties were evaluated.

Material and methods

Pre-treatment of tannin and furfural

Quebracho tannin (Persianchimi Company) was dissolved in a 10% w/w NaOH (Neutron Pharmaceutical Chemistry Company) solution to obtain a 20% w/w tannin solution. The tannin

solution was heated to 80°C for 30 minutes before adding 8% NaSO (Neutron Pharmaceutical Chemistry Company) (w/w based on the dry tannin weight). The solution was stirred at 80°C for 30 minutes. The pretreatment for furfural (Behran Oil Company) was done by adding 5% v/v H₂SO₄ (Neutron Pharmaceutical Chemistry Company) (at 20% v/v) to the furfural and stirring for 20 minutes at 21°C (Yi et al 2016).

Resin synthesis

The previously obtained tannin aqueous solutions (20% w/w) were prepared under vigorous stirring to add furfural. Subsequently, 50% of furfural (based on tannin dry weight) was added to the solution. The resin pH was adjusted to 4.5 with NaOH (33% w/w) according to Ahmadi et al (2022).

Bagasse treatment

Anhydrous sugarcane bagasse were treated using an impregnation method with various tannin/furfural resin (TFu) concentrations. Impregnation was done with 5, 10, and 15% w/w formulations of tannin/furfural resin. As a reference, 0.5 % Boric Acid (BA) (Lactan) (based on the dry weight of the resin) was added to the initial treatment solution in some treatments (Efhamisisi et al 2017). Resin curing operation was carried out by heating at 120°C. Resin uptake was reported in Ahmadi et al (2022).

Particleboard manufacturing

Tannin-Formaldehyde (TF), Tannin-Formaldehyde modified by Furfural (TFFu), Tannin Hexamine (TH) (all synthesized in the laboratory according to Tondi (2017), and Melamine-urea-formal (MUF) (Samad Manufacturing and Industrial Company) were used to bond the treated bagasse. After the curing of resin and drying of bagasse, particleboards were prepared with the dimensions of 400×400×10 mm and a target density of 0.650 g/cm³. Each adhesive type was added at 12% (based on the dry weight bagasse) in a rotary blending machine. The bagasse mixtures were hot-pressed at 160°C for MUF and 190°C for tannin-based adhesive (TF, TFFu, TH) with 40 kg/cm² pressure for an 8–12-minutes press closing time (depending on the adhesive). Three boards were produced from each treatment.

Biological properties

Decay tests were performed strictly according to EN113-3 (2023). Bagasse particleboards samples of size 50×50×10 mm³ (L×l×Thickness) (12 replicates per modality) were exposed to *Coniophora puteana* for 16 weeks at 22°C, 70% Relative Humidity (RH). Solid pine (*Pinus sylvestris*) sapwood was used as controls: (i) 12 samples with the same dimensions as the particleboard specimens 50×50×10 mm³ (L×R×T) as size controls, (ii) 10 samples of dimensions 50×25×15 mm³ (L×R×T) as virulence controls. The mass loss (ML%) of the samples due to the fungal degradation was calculated according to:

$$WL \% = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

where W_1 and W_2 are the anhydrous mass losses of the samples before and after fungal exposure, respectively.

Termite non-choice tests were performed strictly according to EN117 (2013). Bagasse particleboards samples of size 50×25×10 mm³ (L×l×Thickness) (6 replicates per modality) were exposed to 250 termite workers, 5 soldiers and 5 nymphs of *Reticulitermes flavipes* for 8 weeks at 27°C, 75% RH. Virulence controls were conducted the same way, using six untreated pine sapwood samples of dimensions 50×25×15 mm³ (L×R×T). At the end of the test, the termite survival rate was calculated and a visual rating was attributed to the samples.

Data analysis was performed by the two-way ANOVA method in SPSS software. The effect of adhesive, and the effect of resin concentration, were investigated.

Results and discussion

Decay resistance

The results of the decay resistance tests towards the brown rot *Coniophora puteana* are depicted in Fig. 1. The mass losses of both virulence controls and size controls (above 30%) allow to validate the test (EN113-3, 2023).

For all particleboards, whatever the adhesive used, the treatment of bagasse with TFu resin led to a reduced mass loss, compared to untreated bagasse. Particleboards treated with resin containing BA, had significantly higher resistance to fungal degradation. BA is responsible for the granted durability to the particleboards, due to its fungistatic action, and has already been reported as an additive increasing panel product biological resistance (Reinprecht et al 2018, Pizzi 2016).

However, the MUF+TFu (15%) boards presented the lowest mass loss rates of 3.56%. After being exposed to the brown-rot fungus, the boards bonded with MUF adhesive demonstrated greater resistance than the boards bonded with tannin base adhesive. The boards bonded with MUF lost the least amount of weight in both treated and untreated conditions. It is possible that the fungus is prevented from getting into the particleboard due to the density and cohesion of the boards. The type of adhesive has an influence on the biological resistance of particleboards (Shalbafan et al. 2016). Boards, on the other hand, emit formaldehyde, which can affect biological resistance (Mohamad Amini et al. 2018).

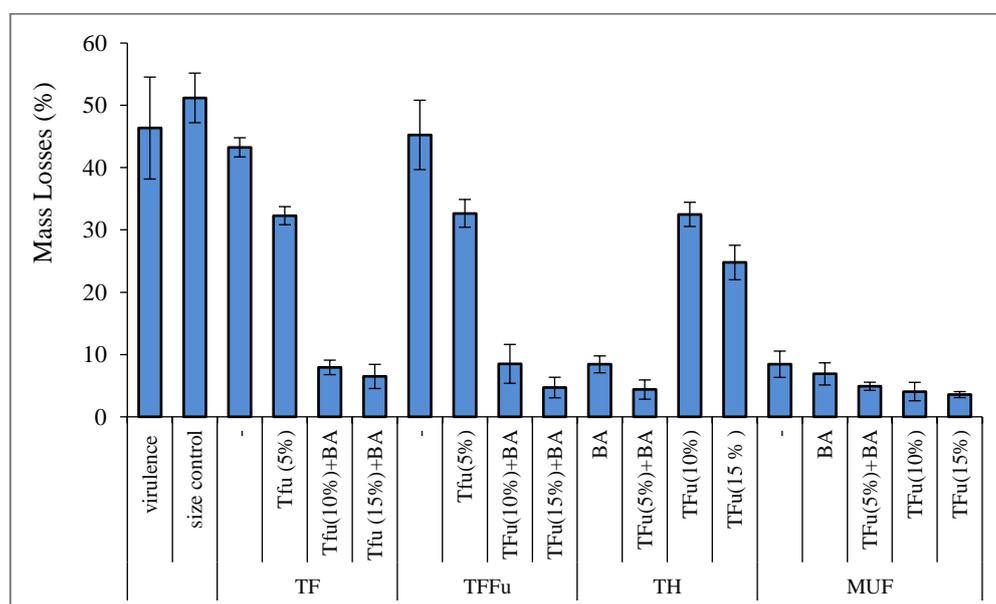


Fig. 1. Mean values of mass loss of the particleboard exposed to the fungus

Termite resistance

Tab. 1 illustrates the mass losses, mortality of termites and Visual rating caused by termite attacks on the specimens. The survival rate of the termites (above 50%) and strong attack of the controls allow to validate this test.

When compared to control samples, pretreatment of bagasse particles with resin TFu at low concentrations (i.e. 5%) results in higher termite mortality, but the panels were still severely degraded (visual rating 4). However, treatment at higher resin concentrations (without BA

addition) has no significant effect. This could be because these boards have more thickness swelling (Ahmadi et al 2022) than the control samples, allowing the termite to enter the particleboard when under moist conditions (such as in the termite culture flasks, 75% RH). MUF-bonded boards have a higher termite mortality rate than tannin base adhesive-bonded boards, when without BA. Boards treated with resin and BA had higher termite mortality than control samples. Boric acid is not a repellent product, but its presence allows to bring efficient protection to the particleboards (Thevenon et al 2009). BA considerably increased the durability towards panels in our study.

Tab. 1. Termite Resistance of TFuR-impregnated particleboard bonded by TF, TFFu, TH, and MUF adhesives

| Description of treatments | | | Termite resistance | | Sample distribution for the visual rating classes (%) | | |
|---------------------------|------------------------|------------|--------------------|-------------------|---|----|-----|
| Adhesive Type | Impregnation Resin (%) | BA (0.5 %) | Survival rate (%) | Visual Rating (*) | 0 | 1 | 4 |
| TF | - | - | 51 | 4 | | | 100 |
| | Tfu (5%) | - | 25 | 4 | | | 100 |
| | Tfu(10%) | + | 0 | 0-1 | 70 | 30 | |
| | Tfu (15%) | + | 0 | 0-1 | 80 | 20 | |
| TFFu | - | - | 23 | 4 | | | 100 |
| | Tfu(5%) | - | 21 | 4 | | | 100 |
| | TFu(10%) | + | 0 | 0-1 | 75 | 25 | |
| | TFu(15%) | + | 0 | 0-1 | 70 | 30 | |
| TH | - | + | 0 | 0 | 100 | | |
| | TFu(5%) | + | 7 | 4 | | | 100 |
| | TFu(10%) | - | 29 | 4 | | | 100 |
| | TFu(15%) | - | 26 | 4 | | | 100 |
| MUF | - | - | 15 | 4 | | | 100 |
| | - | + | 0 | 0-1 | 60 | 40 | |
| | TFu(5%) | + | 0 | 4 | | | 100 |
| | TFu(10%) | - | 5 | 4 | | | 100 |
| | TFu(15%) | - | 5 | 4 | | | 100 |
| Virulence control | | | 56 | 4 | | | 100 |

(*) Rating of wood according to EN 117 (2013)

0 = No attack, No destruction

1= Attempt to attack/ Surface erosion in part of the surface/ The destruction depth of 0.5 mm of fog should not exceed 30% of the surface.

4 = Strong attack/ 1- and 3-mm erosion covering 1/10 of the surface/ The depth of destruction is about 3 mm in the form of holes in the wood mass

Conclusion and perspectives

Our study indicates that the impregnation of bagasse particles with resins improves the biological resistance of the particleboards. The mix with boric acid allows to increase significantly the particle board resistance. This work shows that treating bagasse with tannin-furfural resin to produce particleboard improves their biological characteristics as well as their physico-mechanical properties (Ahmadi et al. 2022). Therefore, particleboards made with bagasse treated with furfural tannin resin and furfural tannin resin with boric acid are suggested potential candidate to overcome the shortage of wooden raw materials for composite production in Iran.

Acknowledgments

This project was supported by The International Center for Scientific Studies & Collaboration (CISSC, Tehran, Iran) and Campus France (Paris, France) through a Gundishapur project (N°1584/N°45227SG).

References

American Society for Testing and Materials – ASTM (2005) D-2017: standard method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of wood. West Conshohocken: ASTM.

Ahmadi P., Efhamisizi D., Thevenon M.F., Zarea Hossainabadi H., Oladi R., Gerard J. (2022) The properties of natural tannin-furfural resin to be used for Poplar wood modification, *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29(2), 1-20.

Baileys J.K., Marks B.M., Ross A.S., Crawford D.M., Krzysik A.M., Muehl J.H., Youngquist J.A. (2003) Providing moisture and fungal protection to wood-based composites. *Forest Products Journal*, 53(1), 76-81.

Berndt C.C., Hodzic A. (2007) Bagasse Fibre for sustainable manufacturing. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 1(3), 289-300.

Efhamisizi D., Thevenon M.F., Hamzeh Y., Pizzi A., Karimi A., Pourtahmasi K. (2017) Tannin-boron complex as a preservative for 3-ply beech plywoods designed for humid conditions. *Holzforschung*, 71(3), 249-258.

EN113-3 (2023) Durability of wood and wood-based products. Test method against wood destroying basidiomycetes. Part 3: Assessment of durability of wood-based panels. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

EN117 (2013) Wood preservatives - Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (Laboratory method). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Gilanipoor N., Najafi A., Spinelli R., Naghdi R. (2021) The exploitation of tree pruning residues and their optimal allocation in the particleboard industry, *Forest Research and Development*, 7(3), 343-358.

Kiatkittipong W., Wongsuchoto P., Pavasant, P. (2009) Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Management*, 29(5), 1628-1633.

Kusumah S.S., Umemura K., Yoshioka K., Miyafuji H., Kanayama K. (2016) Utilization of sweet sorghum bagasse and citric acid for manufacturing of particleboard I: Effects of pre-drying treatment and citric acid content on the board properties. *Industrial Crops and Products*, 84, 34-42.

Lande S., Eikenes M., Westin M., Schneider M. H. (2008) Furfurylation of wood: Chemistry, properties, and commercialization, 21(3), 337-355.

Reinprecht L. (2016) Wood deterioration, protection, and maintenance. John Wiley & Sons.

Sandberg D., Kutnar A., Karlsson O., Jones D. (2021) Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation (1st ed.). CRC Press.

Sargent R. (2019) Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65(1), 1-11.

Thevenon M.F., Tondi G., Pizzi A. (2009) High performance tannin resin-boron wood preservatives for outdoor end-uses. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(1), 89-93.

Tondi G. (2017) Tannin-based copolymer resins: Synthesis and characterization by solid state ¹³C NMR and FT-IR spectroscopy. *Polymers*, 9(6), 3-22.

Yi Z., Wang W., Zhang W., Li J. (2016) Preparation of tannin–formaldehyde–furfural resin with pretreatment of depolymerization of condensed tannin and ring-opening of furfural, *Journal of adhesion science and Technology*, 30(9), 947-959.

Zhang X., Li L., Xu F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. *Forests*, 13(3), 439.

Construction bas carbone : identification des éléments fortement carbonés pour faire émerger des principes de conception favorable – Application pratique à un bâtiment de santé

LANATA Francesca, BOUDAUD Clément, BELLONCLE Christophe, MICHAUD Franck

ESB, LIMBHA, Nantes, France
francesca.lanata@esb-campus.fr

Mots clés : carbone intrinsèque ; bâtiment de santé ; coût économique ; allotissement

Contexte et objectifs

De tous les indicateurs à envisager pour évaluer les impacts environnementaux, celui du carbone a aujourd'hui pris une place importante, et le terme bas carbone est actuellement clairement en vogue. Concentrer la conception et réalisation des bâtiments sur la limitation du carbone (donc monocritère) est à la fois nécessaire, mais insuffisant pour répondre à l'ampleur des enjeux des limites planétaires, dont le climat n'est qu'une composante.

La prise en compte du carbone est une tâche supplémentaire dans le processus de conception et réalisation d'un projet, elle se heurte donc à différents freins. Un sondage auprès des professionnels du secteur met en avant la multiplicité des freins, plus particulièrement l'accent sur le manque de compétences et les coûts perçus par ces temps d'études supplémentaires⁴.

Par ailleurs, de nombreux efforts ont été réalisés pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et baisser la quantité d'émissions du carbone dit opérationnel. Toutefois, le carbone intrinsèque (*embodied carbon* en anglais) joue un rôle significatif et présente un impact immédiat sur le coût carbone. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), ou des dérivés de cette méthode normalisée, permet une mesure de l'impact carbone. On notera que l'approche carbone est un focus monocritère alors que l'approche ACV considère bien d'autres critères d'impact. En France, la Règlementation Environnementale 2020 (RE2020) prévoit des seuils carbone à atteindre progressivement : le poids en équivalent carbone du bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie, les indicateurs IC construction et IC énergie (en kgCO₂eq/m²), évolueront respectivement de 740 à 480 de 2022 à 2031 et de 560 à 260 de 2022 à 2026.

Une première étude de De Wolf et al (2017), établie sur l'analyse de 200 bâtiments récents de différents types, montre une gamme de valeurs moyennes pour le carbone intrinsèque se situant entre 150 et 600 kgCO₂eq/m² (pour des bâtiments contenant entre 200 et 1800 kg de matériaux par m²). Dans un second travail, une analyse plus large permet d'observer à la fois l'impact de la structure et du bâtiment complet sur le CO₂ intrinsèque, résumé ainsi :

- Il existe une variabilité importante en fonction des études quant à l'impact de la structure porteuse sur la quantité observée ;
- Les structures bois présentent à la fois la plus faible quantité et la plus faible variabilité ;
- La partie structure porteuse du bâtiment n'est pas majoritaire dans le total lorsque l'on observe un bâtiment complet.

⁴London Energy Transformation Initiative et LETI, « Climate Emergency Design Guide How new buildings can meet UK climate change targets ».

Fort de l'ensemble de ces axes de réflexion et de travail engagés, le Groupe KORIAN et l'ESB sont associés pour lancer un projet de recherche portant sur deux thèmes : un axe « Santé & Bien-Être » **et un axe « Bâtiment bas carbone », objet de cet article, afin d'identifier les leviers permettant d'avancer sur la valorisation du bois dans les immeubles de santé.**

La construction d'établissements de santé a un impact significatif sur l'environnement notamment en termes d'utilisation de matériaux et de consommation d'énergie. Par conséquent, la construction durable de tels bâtiments impose l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement pouvant être recyclés et ayant une faible énergie intrinsèque et un faible impact sur l'environnement (Kumari et Kumar 2020). Ces bâtiments exigent également une conception en lien avec le particularisme de ses usagers. Des recherches ont montré que l'environnement intérieur pouvait réduire le niveau de stress, qui est particulièrement élevé chez les occupants des bâtiments médicalisés. Le bois, utilisé pour les constructions écologiques, constitue un élément important de la biophilie (Zhang et al 2016). Par conséquent, l'utilisation du bois dans la construction, concomitante à une conception spécifique, peut contribuer à réduire le stress des occupants et à améliorer les indicateurs de soutenabilité des bâtiments médicalisés (Katradyova et al 2019, Lipovac et Burnard 2020).

Matériau et méthode

La littérature définit, indépendamment du type d'usage du bâtiment collectif, l'existence de carbone « hotspots » qui représenteraient 80% du carbone intrinsèque : fondations, structure des murs, toitures. Les services sont souvent omis alors qu'ils représentent une part non négligeable du carbone associé au cycle de vie du bâtiment. Une approche Pareto liant hotspots carbone et coûts associés, et prenant en considération structure porteuse, murs extérieurs et services permet de considérer plus de 70% des coûts économiques.

Les coûts carbone opérationnel et intrinsèque évoluent de façon antagonique. Les efforts des dernières décennies sur l'isolation thermique conduisent à une réduction du coût carbone opérationnel, mais généralement à une augmentation "instantanée et effective" du coût carbone intrinsèque, donc des émissions dès le début du cycle de vie du bâtiment.

La méthode de recherche de bonnes pratiques pour la conception de bâtiments bas carbone est présentée Fig. 1. La méthode proposée consiste à s'adosser à la littérature pour l'appliquer à l'évaluation de bâtiments réels, puis à modéliser les bâtiments réels pour valider et affiner l'évaluation. Ensuite, l'évaluation de variantes doit permettre de valider des préconisations.

Plusieurs maisons de retraite médicalisées ont été identifiées pour observer la relation entre coût économique et coût carbone. La répartition des espaces et le nombre de niveaux sont comparables (Tab. 1). Le principe constructif le plus utilisé est le béton, avec un remplissage en briques sur deux bâtiments. Les revêtements de toiture et de façades sont multiples, ainsi que les systèmes de chauffage. Les menuiseries extérieures sont pour la plupart en aluminium. L'isolation est principalement réalisée en laine minérale.

On trouve dans la littérature (De Wolf 2017, De Wolf 2018), une synthèse d'études de cas sur 36 bâtiments (collectif de tous types), qui chiffre une moyenne du coût économique (€/m²) et du coût environnemental (kgCO₂eq/m²) pour différents lots. Cela permet d'identifier les lots les plus importants en termes de coût et d'établir les différents ratios économique et carbone entre les différents lots de construction. Des valeurs moyennes de CO₂ intrinsèque en équivalent kg/m² ont été évaluées. Une analyse Pareto montre l'importance de certains lots par rapport à d'autres, comme le lot Services et le lot Superstructure. Le premier comprend les éléments d'installations sanitaires et d'eau, systèmes CVC, installations électriques... Le second comprend les éléments de murs ou poteaux porteurs, les planchers et les charpentes/toitures.

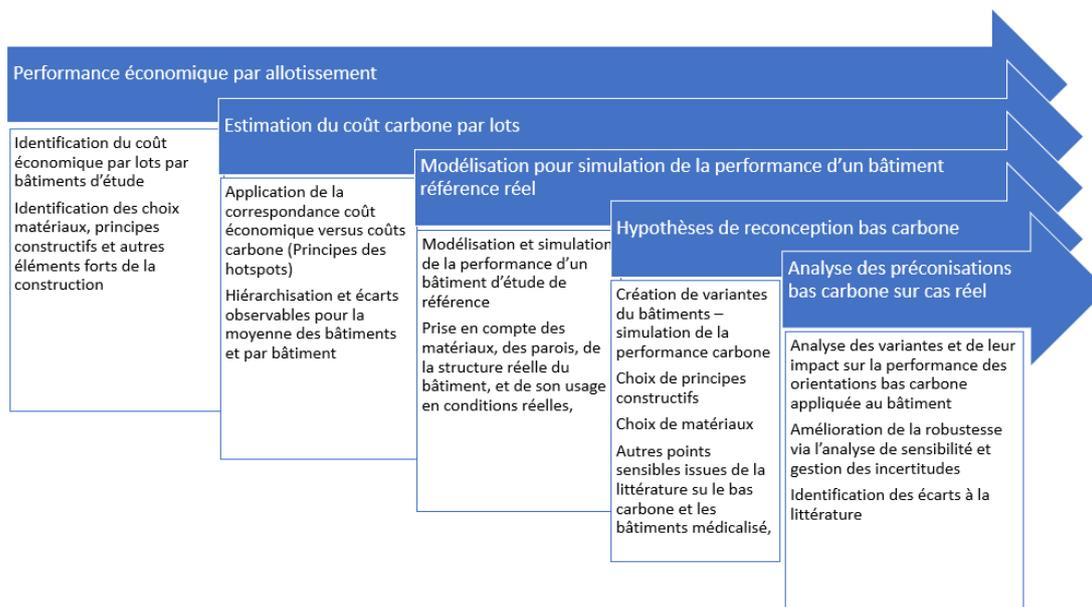


Fig. 1 : Methodologie globale d'analyse de la performance carbone potentiel de batiment type

Tab. 1 : Informations générales sur les bâtiments sélectionnés pour l'étude approfondie

| Bâtiment | Elévation | Surface totale (m ²) | Surface utile (m ²) | Lits |
|----------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------|
| B1 | Sous-sol, RdC + 5 étages | 5367 | 3584 | 91 |
| B2 | RdC + 2 étages | 4609 | 3357 | 82 |
| B3 | Sous-sol, RdC + 3 étages | 8138 | 4886 | 102 |

Carbone intrinsèque des bâtiments : méthodologie rapide d'évaluation par les coûts

Grace aux informations sur les coûts économiques des bâtiments médicalisés de référence, cette méthode permet de remonter au coût carbone. Méthodologiquement, les classes établies par la Royal Institution of Chartered Surveyors ont été préférées aux lots généralement utilisés en France. Ces « New Rules of Measurements » (NRM⁵) définissent jusqu'à 4 niveaux de sous classes, permettant une répartition fine des composants.

Une estimation des ratios pour les bâtiments sélectionnés a été réalisée (données économiques fournies par l'entreprise) en se focalisant sur les lots à priori les plus émetteurs en kgCO₂eq/m², puis en utilisant l'ensemble des données collectées sur les devis et les documents d'analyses économiques. Parfois, faute d'informations, certains coûts sont estimés ou approximatifs.

Résultats et discussions

L'analyse comparée sur les bâtiments d'étude montre une adéquation entre le coût des différents lots et les ratios déterminés. Les tendances se dégageant sont en accord avec les données de la littérature (De Wolf 2017, De Wolf 2018). En effet, la répartition économique globale sur les lots représentant environ 70% du carbone (structure, fondations, murs et services) est bonne, avec un écart moyen de l'ordre de 5 à 8%. Les résultats détaillés des allotissements sont

⁵ Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). « RICS GUIDANCE NOTE : New rules of measurement ». (2021)

présentés par le Tab. 2 (pourcentage de chaque lot par rapport au coût total, lots classés par ordre décroissant d'importance). Le lot Fondations, qui représente à lui seul 24% du carbone, est cependant très variable (de 9 à 16% des couts) en fonction du bâtiment. Cette variabilité s'explique par la présence de sous-sols pour les bâtiments B1 et B3, ce qui n'est pas le cas du B2. Si les éléments Structure et Toiture correspondent avec un écart moyen de l'ordre de 10%, les sous-lots Etages et Murs extérieurs s'écartent anormalement des données de la littérature.

Tab. 2 : Analyse comparée des coûts carbone par allotissement sur les batiments B1 à B3 (versus données issues de la littérature) – Hiérarchisation décroissante par le coût économique moyen

| Code NRM | Allotissement | B1 (%) | B2 (%) | B3 (%) | Coût moyen (%) | Coût moyen Litt. (%) | Ecart | Coût carbone Litt. (%) |
|----------|----------------------|--------|--------|--------|----------------|----------------------|-------|------------------------|
| 5 | Services | 28,2 | 33,6 | 31,2 | 31,0 | 32,7 | 5% | 21,3 |
| 2E | Murs ext. | 7,3 | 4,3 | 6,5 | 6,0 | 12,4 | 51% | 8,8 |
| 2A | Structure | 9,5 | 10,1 | 7,0 | 8,9 | 8,0 | -11% | 14,7 |
| 2F | Menuiserie ext. | 4,8 | 7,2 | 6,2 | 6,1 | 7,3 | 17% | 2,4 |
| 2C | Toiture | 5,7 | 9,6 | 6,1 | 7,1 | 7,1 | 0% | 6,3 |
| 1 | Fondation | 16,4 | 9,2 | 11,8 | 12,5 | 7,0 | -78% | 23,6 |
| 3B | Sols | 3,2 | 3,8 | 4,2 | 3,7 | 5,8 | 36% | 3,8 |
| 2B | Etages | 9,7 | 4,8 | 5,8 | 6,8 | 4,4 | -54% | 10,1 |
| 4 | Aménagements int. | 0,0 | 0,1 | 0,5 | 0,2 | 4,0 | 95% | 0,1 |
| 2G | Murs intérieurs | 3,2 | 3,3 | 5,3 | 3,9 | 3,1 | -27% | 3,4 |
| 3C | Plafond (finition) | 1,8 | 1,0 | 3,7 | 2,2 | 2,9 | 25% | 2,8 |
| 3A | Murs (finition) | 2,4 | 2,8 | 3,2 | 2,8 | 2,6 | -8% | 1,4 |
| 2H | Portes int. | 3,5 | 4,0 | 3,1 | 3,5 | 2,4 | -47% | 0,2 |
| 2D | Escaliers | 1,2 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 2,1 | 60% | 1,1 |

Le bâtiment B2 ne comprend pas de sous-sol et est en R+2, quand les deux autres bâtiments sont construits sur un sous-sol en R+3 et R+6. Le taux de compacité semble différent entre les bâtiments d'étude et devra faire l'objet d'une estimation ultérieure. Cet indicateur ne peut cependant pas expliquer totalement les écarts avec les valeurs moyennes (pas d'accès à la volumétrie des bâtiments de référence). Les autres lots présentent des écarts variables, liés probablement à des problèmes de répartition en raison du manque de détail (certains escaliers par exemple sont reliés au lot Structure), mais pour des impacts carbone faibles. L'analyse fine du lot Services n'est pas possible à ce stade en raison de la grande disparité de présentation des données dans les documents fournis (devis, analyses économiques, plans).

Simulation pour valider l'adéquation coût économique – coût carbone sur cas réel

Afin de vérifier l'applicabilité de la corrélation entre les coûts économiques et le coût carbone sur les bâtiments spécifiques, une étude complète sur un bâtiment existant a été lancée en utilisant le logiciel PLEIADES[®] (Fig. 2). A partir de l'ensemble des plans, des devis et retours d'expérience, un modèle géométrique 3D du bâtiment a été réalisé. Puis, dans un processus similaire à celui mis en œuvre lors d'une analyse de cycle de vie, et en intégrant la description des différents matériaux et une modélisation STD (Simulation Thermique Dynamique), le coût carbone peut être estimé. A chaque étape, la question de la qualité, de la fiabilité des données ou hypothèses se pose, ce qui conduit à travailler de façon itérative sur l'ensemble du processus. Certaines informations manquantes sur les matériaux, sur leur intégration ou leurs assemblages sont questionnées. Cela permet de mieux gérer les incertitudes ou la sensibilité de différents paramètres sur le résultat ainsi que d'introduire au fur et à mesure des données complémentaires.



Fig. 2 : Vue 3D de la modélisation complète du bâtiment B3 (réalisation sous logiciel Pléiades, avec plan 2D détaillé de chaque étage permettant une simulation STD ou ACV)

Une fois la description du bâtiment complétée (matériaux, orientation, volumes...), un calcul estimatif des indicateurs de la RE2020, et en particulier de l'indicateur Ic Construction (intrinsèque et opérationnel), est opéré. Le calcul est opérable par lot et permet une autre approche des quantités carbone mises en œuvre et, via les devis et rectificatifs associés, des coûts économiques. Une approche fine et plus robuste est donc associée avec l'approche « grande maille » liée à la littérature. Les résultats futurs de l'utilisation de ce modèle sont l'identification des options de variantes ayant un impact potentiel sur le bilan carbone, puis, après intégration des variantes (composition parois, systèmes constructifs...) au logiciel, la comparaison et l'analyse des résultats des calculs carbone, et des ratios économiques associés aux variantes. L'analyse de plusieurs variantes en fonction des observations et des besoins d'analyse de sensibilité et de gestion des incertitudes, doit conduire à des enseignements en termes de construction bas carbone pour les bâtiments.

Axes principaux à fort potentiel pour la conception et les variantes :

- Interroger le choix de rénover plutôt que de construire en neuf car les matériaux d'origine du bâtiment à rénover apportent une économie d'émission de GES qu'un bâtiment neuf ne peut pas rattraper.
- Utiliser des matériaux de réemploi, car considérés par la RE2020 comme à impact nul.
- Développer la frugalité des choix constructifs (limitation des volumes de matériaux par une simplification des formes - notion de compacité), ou par une optimisation (systèmes de dalles nervurées plutôt que dalles épaisses).
- Mutualiser les lots à fort impact carbone (ex intégrer les parkings à l'urbanisme du quartier).

Il faudra de plus prendre en compte les limites actuelles :

- Complexité et coûts d'études supplémentaires pour l'utilisation de matériaux de réemploi.
- Existence/incertitudes sur les données environnementales.
- Incertitude de l'impact de secteurs/activités à long terme (évolution des transports...).
- Prise en compte des impacts autre que le carbone (ACV complète, biodiversité) et des responsabilités/dépendances qui sont liées. Par exemple pour le béton, les problématiques liées au sable (raréfaction) ; pour le bois, les problématiques de protection des forêts ; pour des isolants biosourcés, les problématiques de conflit d'usage des sols agricoles.

Conclusions et perspectives

Matériau utile pour la réduction du carbone intrinsèque des bâtiments, le bois peut également l'être dans l'intérêt psychologique et physiologique des occupants. Cependant, il est rare que le même matériau soit utilisé pour répondre à l'ensemble de ces fonctions. On trouve

régulièrement des éléments d'imitation bois (porte, sol, plafond) intégrés aux bâtiments médicalisés. Pourquoi dissocier les effets ? Il est ainsi nécessaire de questionner régulièrement les modes d'utilisation pour retrouver les synergies possibles. Ce programme doit permettre d'aboutir à une meilleure conception, une diminution des impacts environnementaux, des bâtiments plus sains.

Intégration des éléments de santé et de bien-être dans les variantes bas carbone

Les éléments bois intégrés à l'architecture représentent un gain important dans le calcul du carbone intrinsèque. C'est la raison pour laquelle un nombre croissant de bâtiments adopte ce matériau. Ce matériau de structure peut être masqué ou affiché comme un élément participant au bien-être des résidents. Les variantes bas carbone doivent permettre la valorisation du matériau selon les lieux et leur fonction. Une économie de fonction doit pouvoir également être prise en compte (absence de peinture...). L'adoption à grande échelle du bois pour les applications intérieures dans les bâtiments de santé suscite cependant des réticences. Certaines recherches ont pourtant montré que les matériaux en bois non traités ont des propriétés antimicrobiennes contre un large éventail d'agents pathogènes, et que leur nettoyage est équivalent aux autres matériaux usuels. Un programme d'impact du bois sur le développement bactérien et la qualité de l'air (aérosol microbien, particules, COV) *in-situ* est en cours pour confirmer ces effets.

Remerciements

Ce projet est un partenariat ESB, KORIAN financé dans le cadre du programme France RELANCE. Un remerciement à Madame Annabelle BILLY, initiatrice du projet chez KORIAN aujourd'hui au CHU de Limoges (Construction de Patrimoine). La modélisation 3D numérique du bâtiment d'étude a été réalisée par Daniele DA COSTA et Eunice YOUYATTE, élèves ingénieures de l'ESB.

Références

- De Wolf C, Yang F, Cox D, Charlson A, Seif Hattan A, Ochsendorf J (2017) Material Quantities and Embodied Carbon Dioxide in Structures. *Engineering Sustainability*. 169(4):150–161.
- De Wolf, Pomponi F, Moncaster A (2018) Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*. 140:68-80.
- Lipovac D, Burnard MD (2020) Effects of visual exposure to wood on human affective states, physiological arousal and cognitive performance: A systematic review of randomized trials. *Indoor and Built Environment*. 1420326X2092743 doi:10.1177/1420326X20927437.
- 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.
- Kumari S, Kumar R (2020) Green Hospital—A Necessity and Not Option. *J. Manag. Res. Anal.* 7:46–51.
- Zhang X, Lian Z, Ding Q (2016) Investigation variance in human psychological responses to wooden indoor environments. *Building and Environment* 109:58–67.

Application de la méthode des EF pour la modélisation du déroulage du bois vert

YAICH Mariem¹, VIGUIER Joffrey¹, DENAUD Louis¹, HAKIM Said Youssouf¹,
COTTIN Fabrice¹

¹Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM Université,
F-71250 Cluny, France
[Mariem.Yaich@ensam.eu](mailto:Mariam.Yaich@ensam.eu)

Mots clés : Bois ; Déroulage ; Modélisation ; Eléments Finis ; Endommagement

Contexte et objectifs

Le bois, contrairement aux métaux, est un matériau complexe par son hétérogénéité naturelle. Les premiers niveaux de variabilité sont ceux de l'inter-essence et de l'intra-essence, qui reflètent les différences en termes de propriétés physiques et mécaniques entre les essences et au sein d'une même espèce d'arbre. À cela se rajoutent les spécificités locales du bois liées à son développement telles que les nœuds, les cernes de croissance, le bois de réaction... qui agissent sur l'efficacité de l'usinage par déroulage du bois vert. Ce procédé, bien qu'étant une technique ancienne, s'inscrit parfaitement dans le contexte actuel de la transition écologique et de réduction d'émission du CO₂. Ce procédé a évolué au fil du temps en intégrant de nouvelles essences, parfois issues de bois de qualité secondaire afin d'optimiser son utilisation et le valoriser. Ce procédé de première transformation, dont le produit final est le copeau, a fait l'objet de nombreuses études expérimentales. En revanche, outre la variabilité intrinsèque du bois à différentes échelles, il s'ajoute à cela la complexité du procédé en lui-même et les interactions entre ses différents paramètres (barre de pression, géométrie et orientation du couteau...), ce qui rend l'optimisation du procédé de déroulage, basée uniquement sur une étude expérimentale, un véritable défi, en raison du nombre exhaustif des essais à réaliser pour toutes les essences de bois. Pour cela, la mise en place d'une approche numérique, bien qu'approximative, s'avère avantageuse, car elle permet de découpler l'effet des différents paramètres et de simplifier le procédé.

Dans une optique de réduction des coûts, d'anticipation du comportement du bois lors de la coupe, de maîtrise de sa transformation et de compréhension des phénomènes locaux accompagnant la formation du placage, notamment sa fissuration et la variation locale de son épaisseur, une nouvelle méthode par EF est proposée dans cette étude. Dans ce contexte, une sous-routine a été développée sur Fortran dans le but de prendre en considération l'anisotropie du bois, avant et après son endommagement. Une étude préliminaire est mise en place pour sa validation, dans le cas des modélisations 2D et 3D à faibles vitesses de déformations et pour différentes essences de bois. Elle est complétée par la simulation du procédé du déroulage du hêtre, un bois relativement homogène. Le modèle numérique de coupe est ensuite validé sur la base d'une campagne expérimentale du déroulage effectuée avec la ligne multi-instrumentée du LaBoMaP.

Matériel et méthode

Implémentation numérique

Dans une optique de simplification, nous négligeons, dans cette étude, l'effet des cernes de croissance, des nœuds, de l'orientation locale des fibres... sur le comportement du matériau

bois. Nous menons cette étude en supposant qu'il s'agit d'un matériau homogène orthotrope, dont la déformation est principalement dépendante du type de chargement et de sa direction.

Pour le comportement en endommagement du matériau bois, le critère de Hashin (1980), souvent utilisé pour prédire l'endommagement dans des matériaux composites stratifiés, est retenu dans cette étude. Il a la particularité de prendre en considération la rupture différée dans le matériau étudié (selon la direction parallèle aux fibres ou celle transverse) sous l'effet d'une sollicitation en traction ou compression. Ce critère est couplé avec une loi linéaire d'évolution d'endommagement. Ce choix est justifié par la nécessité de prédire les deux types de rupture présents dans le bois : (1) la rupture fragile au niveau des fibres, modélisé par la suppression de l'EF une fois l'endommagement initié ; et (2) la rupture ductile de la partie non fibreuse, obtenue principalement dans le cas d'une sollicitation perpendiculaire aux fibres et générant une diminution progressive des propriétés mécaniques du matériau jusqu'à son endommagement final.

Bien que ce modèle soit implémenté dans Abaqus, sa limitation à des conditions particulières de chargements, ne correspondant pas à ceux du procédé de déroulage, et à des modélisations en 2D, explique l'intérêt de l'implémentation numérique effectuée dans cette étude. Les principales parties de la VUMAT développée dans cette étude sont détaillées par la Fig. 1. Du fait que la formation de placage est un procédé assez complexe, dont des niveaux importants de sollicitations viennent s'additionner aux problèmes liés à la forte variabilité du matériau, la validation de la VUMAT est effectuée, dans un premier temps, sur des essais mécaniques unidirectionnels (de type traction, compression et flexion 3 points) et à faibles vitesses de déformation. Elle est suivie, dans un deuxième temps, par la modélisation du déroulage.

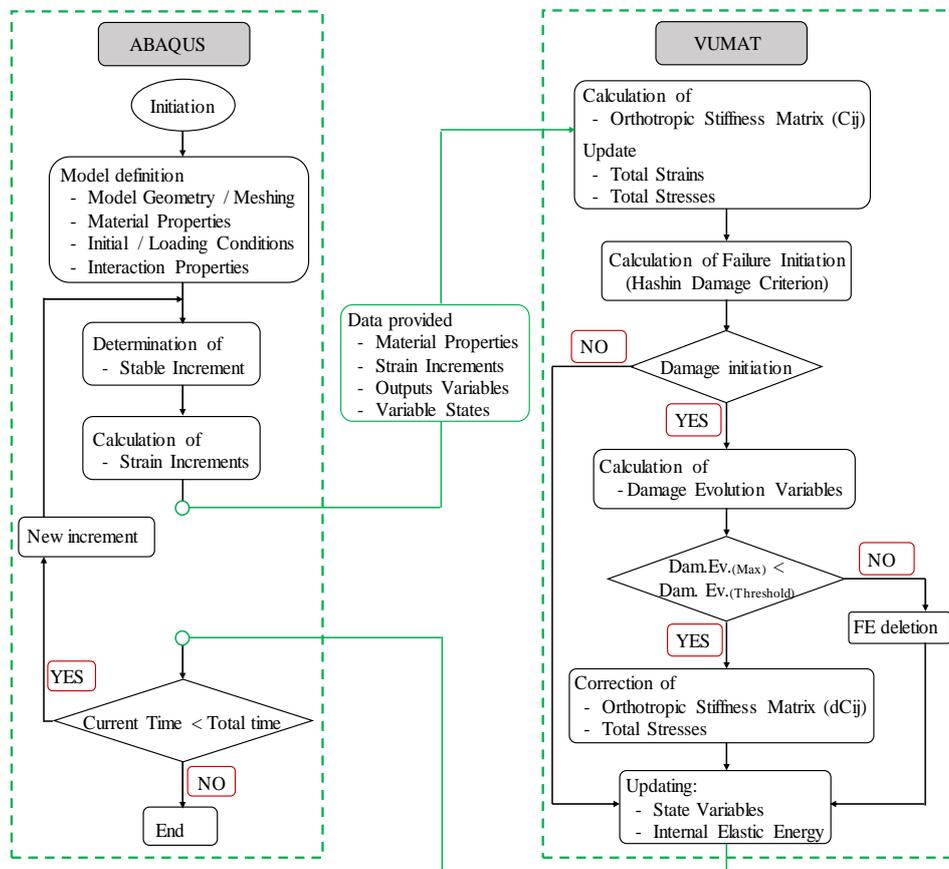


Fig. 1 : Organigramme de la méthode utilisée pour l'implémentation du modèle d'endommagement dans Abaqus/Explicit

Modèles numériques

Des modélisations numériques 2D et 3D sont mises en place. La géométrie des éprouvettes étudiées, pour chaque essai mécanique, est illustrée par la Fig. 2. Elles correspondent à celles expérimentales de la littérature (Karagiannis 2016, Wargula,2021, Khennane 2014), dont les résultats sont utilisés pour vérifier la pertinence des simulations numériques. Les mêmes conditions de chargement sont définies. Plusieurs essences de bois verts (épicéa, pin, hêtre...), dont les propriétés mécaniques sont directement prises de la littérature (Murray 2007, Sandhaas 2019), ont été étudiées.

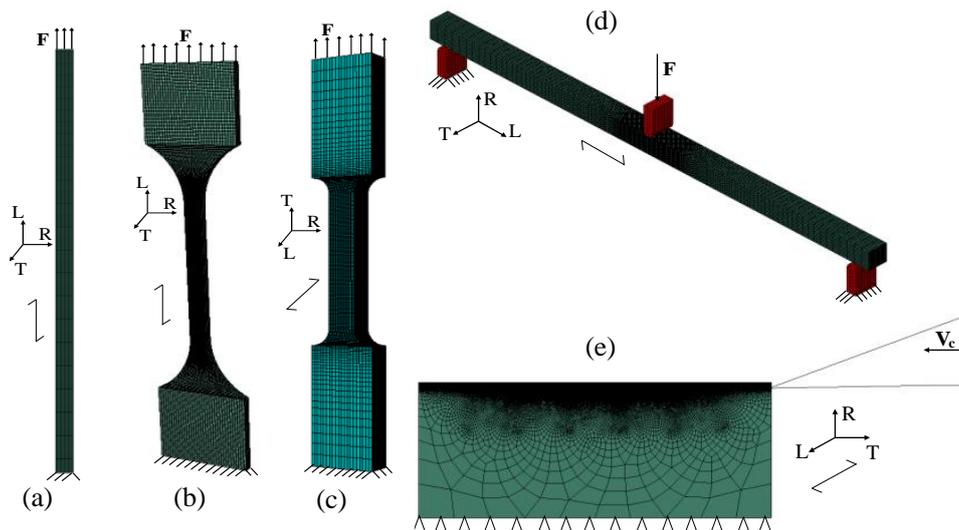


Fig. 2 : Modèles géométriques définis dans le cas de : traction longitudinale (épicéa) (a) 2D et (b) 3D, (c) traction tangentielle 3D (pin), (d) flexion 3 points 3D (épicéa) et (e) coupe orthogonale 2D (hêtre)

La modélisation du procédé du déroulage est réalisée avec un modèle de coupe orthogonale 2D, comme illustré dans la Fig. 2. Une vitesse de coupe de 1.5 m/s est définie au couteau, et aucune barre de pression n'est utilisée. Ce choix est motivé par l'intérêt de diminuer les paramètres agissant sur les résultats numériques, et par suite se focaliser sur la capacité de la VUMAT à reproduire le comportement du bois dans le cas du déroulage, tout en évitant les problèmes de simulations souvent rencontrés suite à une mauvaise gestion des conditions de contact couplées à des chargements fortement dynamiques. Une seule épaisseur de placage de 0.6 mm est modélisée dans cette étude.

Résultats et discussion

Comme illustré par la Fig. 3, différents modes d'endommagement ont été obtenus en fonction de la direction de la sollicitation. En se basant sur les résultats expérimentaux de la littérature, une adéquation en termes de prévision de la zone endommagée et de la propagation des fissures est soulignée. D'autre part, les résultats de la modélisation du procédé du déroulage montrent la formation d'un placage avec peu de variation de son épaisseur. Les efforts modélisés sur le couteau sont également homogènes, témoignant d'une coupe stable. Ces résultats restent cohérents avec les essais de déroulage réalisés avec la dérouleuse du LaBoMaP dont la stabilité de la coupe et la diminution des vibrations dans la machine ont été soulignées pour la condition de coupe étudiée. Quant aux efforts appliqués sur le couteau, l'utilisation de la méthode de suppression des EF endommagés a contribué à une diminution brusque des valeurs, résultant par suite à des écarts avec les résultats expérimentaux.

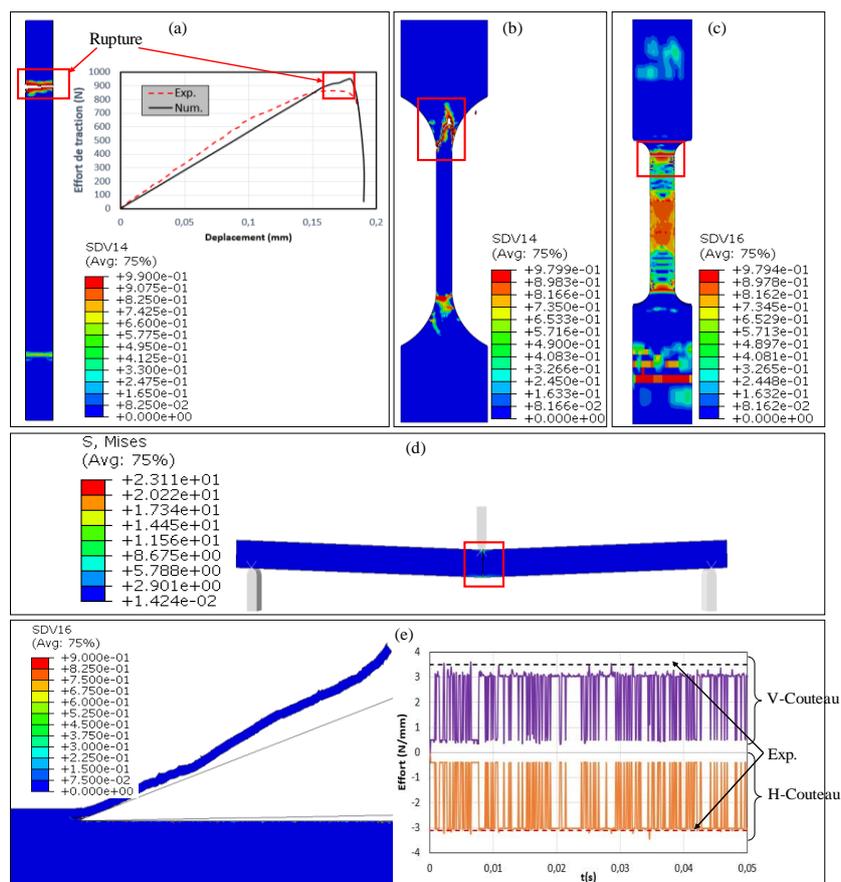


Fig. 3 : Propagation de l'endommagement pour différents types de sollicitation (avec SDV14 et SDV16 sont la variable d'endommagement en traction selon la direction de la fibre et celle transversale, respectivement)

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en place un premier modèle par EF du procédé de déroulage. La définition du modèle d'endommagement de Hashin dans le cas des conditions de chargements quasi-statiques, comme pour le déroulage avec des chargements combinés et plus dynamiques, a montré des résultats prometteurs. Certes, ces premières modélisations du déroulage sont réalisées sur le hêtre, qui est un bois homogène avec peu de variabilité ; en revanche, des niveaux acceptables de corrélations sont atteints. Cela met en évidence la pertinence des choix effectués, en termes du modèle d'endommagement et des implémentations élaborées. Cette analyse nécessite d'être approfondie afin d'étudier les principaux paramètres agissant sur la qualité du placage et la propagation des fissures.

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet JENII (Jumeaux d'Enseignement Numériques, Immersifs et Interactifs) soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (JENII – ANR-21-DMES-0006).

Références

- Hashin Z. (1980) Failure criteria for unidirectional fiber composites. *J. Appl. Mech.*, 47, 329–334.
- Karagiannis V. (2016) Behaviour of hybrid timber-steel beam-to-column connections.

Khennane A.M.K. (2014) Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures. *Mechanics of Materials*, 68, 228-236.

Murray Y. (2007) Manual for LS-DYNA wood material model 143 (No. FHWA-HRT-04-097). United States: Federal Highway Administration.

Sandhaas C.A.S.-W. (2019) Numerical modelling of timber and timber joints: computational aspects. *Wood Science and Technology*, 54, 31-61. doi:<https://doi.org/10.1007/s00226-019-01142-8>

Wargula L.D.W. (2021) Symmetric nature of stress distribution in the elastic-plastic range of pinus L. pine wood samples determined experimentally and using the finite element method (FEM). *Symmetry*, 13, 39.

Étude de l'intégration du procédé de Stratoconception[®] dans le processus de conception d'architectures non-standards en bois

NEHLAWI Anwar^{1,2}, MEYER Julien¹, BLÉRON Laurent², FRÉCHARD Victor¹

¹École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, MAP-CRAI, Nancy, France

² Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Epinal, France
anwarnehlawi@hotmail.com

Mots clés : Stratoconception[®] ; nœuds d'assemblage ; conception paramétrique ; architecture non standard ; résilles

Contexte et objectifs

Le procédé de Stratoconception[®], appartenant à la famille des procédés de fabrication additive par stratification de couches solides permet la réalisation de pièces de forme complexe, évidées et fonctionnalisées (Barlier 1991; ISO/ASTM 2021). Ce procédé repose sur l'usinage de matériaux sous la forme de panneaux par des machines à commande numérique triaxiales. Ainsi, les panneaux en bois dont l'utilisation est courante dans les pratiques des entreprises de la construction se prêtent bien à l'exercice. Ce partage de moyens techniques et matériels favorise l'implémentation du procédé de Stratoconception[®] dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois (Fréchard et al 2022). Ainsi, Fréchard et al (2023) identifient le procédé de Stratoconception[®] comme « une technologie prometteuse qui permet de dépasser les limites actuelles de l'architecture en bois ».

Ce procédé s'intègre dans la phase de fabrication (Wiberg et al 2019), et est traité après la phase de conception de la pièce. Fréchard et al (2023) observent cependant une interdépendance entre la conception et la fabrication de composants architecturaux par Stratoconception[®], appelant à l'intégration des contraintes de fabrication dans le processus de conception. Il est également pointé un manque d'interopérabilité entre les logiciels utilisés pour la conception des composants et ceux concernant le processus de fabrication par Stratoconception[®].

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'interopérabilité entre la conception architecturale, du concept à la conception paramétrique, et la fabrication numérique par Stratoconception[®]. Ce travail s'intéressera particulièrement à l'intégration des opportunités et des contraintes de fabrication par Stratoconception[®] dès la phase amont du projet architectural par le développement d'outils numériques d'assistance à la conception. Ces derniers favoriseront le développement de composants architecturaux optimisés au regard de la gestion de leur consommation de matière ainsi que des temps et des coûts associés à leur réalisation. Ce développement participera à la mise en place d'une continuité informationnelle numérique liant les phases précoces de l'activité de conception de composants architecturaux à leur exécution.

Pour cela nous nous intéressons à un cas d'application traitant le développement de nœuds d'assemblage pour les systèmes constructifs basés sur des treillis tridimensionnels, particulièrement les résilles rigides. Les résilles rigides sont des coques autoportantes « constituées d'éléments relativement courts, fabriqués hors site et assemblés les uns aux autres sur site pour former une grille discontinue » (Charest et al. 2019) mettant en valeur le savoir-faire manuel et numérique des concepteurs et des constructeurs (Chilton et Tang 2016). Les différentes typologies de nœuds d'assemblage mises en œuvre dans ces structures sont presque exclusivement basées sur l'utilisation de matériaux métalliques (Hwang 2010). L'utilisation du procédé de Stratoconception[®] permet désormais la réalisation de nœuds d'assemblages

structuraux en bois intégrant d'autres fonctions comme le passage de réseaux sec et/ou humides, l'éclairage, la sécurité incendie ou encore le support des complexes de l'enveloppe tout en participant à l'expression architecturale du système constructif.

Matériel et méthode

Afin d'évaluer l'interopérabilité entre la conception architecturale et la fabrication numérique par Stratoconception[®] nous mettons en place une première expérience de « *conception – fabrication – mise en œuvre* » d'un treillis tridimensionnel constitué de nœuds d'assemblage en bois *stratoconçus* et de barres en bois réemployées et recalibrées à une section droite de 60x60 mm. Ce travail à l'échelle 1:1 nous permettra d'inventorier les différentes tâches et leurs implications, de collecter les données utilisées et échangées, mais également d'identifier les problématiques associées à la mise en place d'un continuum informationnel numérique. L'expérience se compose de quatre phases successives (Fig. 1) :



Fig. 1 : Les phases conception-fabrication, MAP-CRAI

Phase 1 : Conception paramétrique :

Dans un premier temps, notre objectif était de créer un générateur de nœuds tridimensionnels dans le logiciel de conception paramétrique, Grasshopper⁶, qui nous permet de gérer des géométries complexes et d'automatiser les tâches de génération de formes. Des algorithmes ont été montés et optimisés pour créer des nœuds complexes, collecter des données et tester la cinématique de montage.

Phase 2 : Esquisse

Cette phase a comme but de tester l'outil paramétrique créé dans la phase précédente. Nous avons proposé le concept d'un abri à réaliser dans le patio sud de l'ENSA Nancy que nous appelons TADAM. Il s'agit d'une coque dessinée à la main et inspiré d'une feuille d'arbre qui s'appuie sur trois points et s'autoporte grâce à sa surface en double courbure. L'esquisse a été retranscrite en surface 3D puis reconstituée à l'aide d'une grille qui a généré, en filaire, la résille. Les données géométriques de cette structure filaire seront traitées automatiquement dans l'algorithme développé pour obtenir les nœuds tridimensionnels à fabriquer.

Phase 3 : Fabrication

Une fois la géométrie des nœuds générée et validée, nous procédons à la FAO. Le logiciel StratoPRO⁷ nous permet d'importer les modèles 3D afin de les trancher et créer le parcours d'outil pour l'usinage. L'usinage a été effectué à l'aide de la CNC ISEL FLATCOM4 sur des panneaux LVL de 1200x600x21 mm.

Phase 4 : Montage

À ce stade, nous sommes en train de finaliser la fabrication de derniers nœuds avant d'entamer cette phase finale qui consiste à monter toute la résille et à évaluer l'ensemble du processus conception-fabrication.

⁶ Disponible à l'adresse : <https://www.grasshopper3d.com/>

⁷ Disponible à l'adresse : <https://www.stratoconception.com/produits/logiciels/stratopro>

Résultats et discussion

Limites physiques

Toute forme n'est pas réalisable par Stratoconception®. En effet, en fonction de l'épaisseur de la strate, il peut potentiellement subsister des zones non accessibles par fraisage avec un système d'usinage 3 axes tels que des contre-dépouilles. L'architecte doit donc avoir la moindre connaissance de ce procédé de fabrication pour s'en servir le mieux possible. Dans le cas de notre expérience, nous avons dû reprendre plusieurs éléments dans l'esquisse initiale afin d'être capables de fabriquer les nœuds par usinage triaxial.

Aspect itératif du processus

Ce travail de recherche implique des allers-retours fréquents entre les phases de développement, en raison de la nature non linéaire du processus. La Stratoconception® impacte la conception architecturale en demandant à l'architecte de comprendre comment les strates seront sculptées par la fraise. Le contexte expérimental de ce projet nous implique de faire de nombreuses itérations entre les différentes phases.

Chaîne numérique fragmentée

Le workflow est encore fragmenté entre l'esquisse et la conception paramétrique. Pour passer à StratoPRO également, une rupture numérique empêche d'avoir un workflow fluide.

Optimisation du temps de fabrication/assemblage

Sur StratoPRO, nous générons les parcours d'outils et les Gcodes pour usiner des nœuds en panneaux LVL des deux côtés. Avec une CNC ISEL FLATCOM 3 axes, nous avons obtenu de bons résultats sur des panneaux LVL de 21 mm d'épaisseur en utilisant une fraise de 8 mm à 18000 tr/min et une avance de 3000 mm/min (chipload = 0,18). Ces paramètres offrent actuellement le meilleur compromis entre vitesse, qualité et durabilité des outils, bien que des améliorations soient envisageables pour les nœuds restants dans ce contexte expérimental. La face verso de l'usinage est la plus lente en raison du détachement des strates. Fixées avec des rubans adhésifs double-face, les strates risquent de bouger à cause de la poussée latérale de la fraise, affaiblissant leur fixation sur la machine.

Il est important de noter que l'esquisse initiale impacte directement le temps d'usinage et d'assemblage des pièces en fonction de la complexité géométrique, la taille et la stratification désirée. La stratification, définie comme la hauteur des passes de finition, a un effet significatif sur la durée de l'usinage. Dans ce projet, nous avons choisi une stratification de 0,7 mm pour obtenir une surface de finition lisse en peu de temps.

Optimisation des pertes matières

Les strates sont mises en panoplie automatiquement sur les panneaux grâce au logiciel StratoPRO. Cependant, la distribution des strates n'est pas optimale et peut être encore développée pour usiner plus de pièces dans moins de panneaux (Fig. 2, 3).



Fig. 2 : Usinage d'un nœud par Stratoconception®, MAP-CRA



Fig. 3 : Assemblage d'un nœud, MAP-CRAI

Conclusion

La chaîne de conception prototypée a mis en évidence les avantages et les limitations inhérents à l'approche de Stratoconception® dans le contexte du "Design For Additive Manufacturing". Des travaux restent à mener pour que les architectes puissent pleinement bénéficier de ce procédé dans la réalisation d'architectures non standard. Les limites physiques, les ruptures dans la chaîne numérique et la nature itérative du processus rendent le continuum difficilement utilisable par les architectes. De plus, nous avons remarqué que l'architecte, avant la phase conception, doit s'introduire à la Stratoconception® pour mieux bénéficier de ses avantages et réussir à contourner ses contraintes dès la phase d'esquisse.

Travail en cours et perspectives

Afin de rendre la Stratoconception® plus efficace et fructueuse dans le domaine de l'architecture, un prototype à l'échelle 1:1, appelé TADAM, intégrant une réflexion architecturale est en cours de finalisation à l'ENSA Nancy. Les observations faites lors de l'évaluation de ce premier prototype serviront de base pour la conception du pavillon prévu dans le cadre du projet Archi-Folie soutenu par le Ministère de la Culture en vue de l'Olympiade Culturelle de 2024.

Remerciements

UMR 3495 MAP-CRAI, ENSA Nancy, CIRTES (pour l'utilisation du logiciel), Charpente Houot, Weisrock Vosges, LERMAB et le Ministère de la Culture

Références

- Barlier C (1991) Brevet original Stratoconception®: Procédé pour la création et la réalisation de pièces par C.A.O et pièces ainsi obtenues, 26.02.91 France FR 2.673.302 B1 et Europe EP 0585502B
- Charest P et al (2019) Assessing the Complexity of Timber Gridshells in Architecture through Shape, Structure, and Material Classification, *Bioresources*, 2019, 14: 1364-1378, doi : [10.15376/biores.14.1.1364-1378](https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1364-1378).
- Chilton J, Tang G (2017) *Timber gridshells: architecture, structure and craft*. London ; New York : Routledge, 258 p, ISBN : 978-1-138-77529-9.
- Fréchar V, Bléron L, Meyer J, Duchanois G, Besançon F (2023) Stratoconception, an additive manufacturing process for timber architecture: challenges and opportunities. *Proceedings of the World Conference of Timber Engineering, Oslö (NOR)*, doi : [10.52202/069179-0482](https://doi.org/10.52202/069179-0482).
- Hwang KJ (2010) *Advanced investigations of grid spatial structures considering various connection systems*. Dissertation de l'Université de Stuttgart. 129 p, ISBN : 978-3-922302-31-5.
- Meyer J (2017) *Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées : application à l'architecture en panneaux de bois*. Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine.

Master Sciences du Bois à l'Université de Montpellier : Bilan après 3 ans de pédagogie active

AUTISSIER Aurélie¹, BARDET Sandrine², CLAIR Bruno²

¹FDS, Université de Montpellier

²LMGC, Université de Montpellier, CNRS

aurelie.autissier@umontpellier.fr

Mots clefs : formation ; master ; sciences du Bois ; interdisciplinarité ; apprentissage actif ; approche par compétences ; projets

Introduction

La formation du master Sciences du Bois a ouvert en 2021 à la suite d'une réflexion au Journées Scientifiques du GDR Sciences du Bois 2018 à Cluny. Elle a été élaborée collectivement par une équipe pédagogique pluri-disciplinaire en s'appuyant sur une approche par compétence et des méthodes de pédagogie active, notamment l'apprentissage par problèmes, l'APP (Savery, 2006). L'APP a pour objectif de développer la coopération, la curiosité et l'esprit critique des étudiant·e·s (Kuhn, 2021). L'apprentissage actif se décline dans le master par des séances d'apprentissage par problème et de nombreux projets en groupes (Reverdy, 2013). De nombreuses sorties sur le terrain sont réalisées que ce soit en forêt, dans des écoles d'ingénieurs partenaires ou des visites d'entreprises et de chantier en construction bois etc.

Le contenu pédagogique du master est pluridisciplinaire autour de la forêt et du bois (biologie, chimie, physique, mécanique, économie et sciences humaines) jusqu'aux diverses utilisations du bois dans la filière actuelle et future (matériaux bio-sourcés, chimie verte, bioraffinerie etc.).

Les objectifs du master sont de favoriser l'interaction enseignant.e.s / étudiant.e.s ainsi que la collaboration entre les étudiant·e·s et de développer la pluridisciplinarité. Ainsi, dans un premier temps nous présenterons le flux des étudiant·e·s et le fonctionnement interne du master puis l'amélioration continue de la formation.

Dans un deuxième temps nous exposerons des exemples de pédagogies actives mise en œuvre dans le master en se focalisant sur la première promotion de master 2. Le bilan de l'impact de cette pédagogie sur l'apprentissage des étudiant·e·s sera également présenté.

La dernière partie de ce résumé présentera les résultats de professionnalisation du master lors des stages et les résultats des premières embauches de la première promotion du master.

Le recrutement des étudiant·e·s et le fonctionnement du master

Le maintien d'une hétérogénéité de profils dans le recrutement des étudiant·e·s

La commission de recrutement du master est attentive à la mixité de genres, de profils et de parcours scolaires et professionnels.

Toutes confondues, les trois premières promotions de master se composent de la façon suivante :

- 32 hommes et 21 femmes soit 57% d'hommes et 43% de femmes,
- 68% des étudiant·e·s sont issu·e·s de licences généralistes, 23% de licences professionnelles et 9% sont en reprise d'étude,

- Les étudiant·e·s ont un parcours avant le master dans les domaines de la biologie/forêt (50%), des sciences de l'ingénieur (27%), de la chimie (13%) ou d'autre parcours comme les sciences économiques, sociales, la gestion ou les mathématiques (10%),
- 32% des étudiant·e·s viennent de l'Université de Montpellier, 68% hors UM dont 4% sont étrangers,
- Les âges varient de 19 à 54 ans.

Les régimes d'étude proposés dans le master sont aussi divers : 72% des étudiant·e·s sont inscrit·e·s en formation initiale, 21% en apprentissage et 7% en formation continue.

Le maintien d'un accompagnement pluridisciplinaire et d'une interaction avec les étudiant·e·s

Depuis trois ans d'existence, le premier enjeu du master Sciences du Bois est de coordonner une équipe pédagogique large, interdisciplinaire et d'assurer la mise en place de la maquette pédagogique. L'équipe de pilotage co-dirigée par Sandrine BARDET et Bruno CLAIR s'est donc appuyé sur le recrutement d'une ingénieure pédagogique, Juliette CIANO d'octobre 2020 à janvier 2023, puis Aurélie AUTISSIER, toutes deux ingénieures ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois). L'ingénieure pédagogique a un rôle de coordination entre les membres de l'équipe pédagogique (EC, chercheur·euses et acteurs privés de la filière), et de lien avec les étudiant·e·s. Sa formation d'ingénieure bois (ENSTIB) est essentielle pour jouer ce rôle.

L'équipe s'est élargie avec le recrutement d'une gestionnaire financière et administrative, Julie MARTIN grâce au soutien de l'UM et des mécènes.

Après une phase de création, l'étape suivante est de pérenniser la formation et de répartir les responsabilités, ainsi l'équipe de pilotage s'est élargie à la rentrée 2023 avec :

- Delphine JULLIEN professeure au LMGC, responsable de la 1^{ère} année,
- Hélène FULCRAND, directrice de recherche à l'UMR IATE et Jean-Yves WINUM professeur à l'IBMM, co-responsables du master 2.

L'amélioration continue de la formation

La formation s'améliore continuellement grâce à 3 actions régulières :

- retours hebdomadaires des étudiant·e·s (débrief) en présence des enseignant·e·s responsables des enseignements de la semaine ;
- enquête sur la perception des étudiant·e·s des différentes pédagogies actives réalisée par l'Observatoire de la Transition Pédagogique réalisée sur la première promotion du master ;
- mise en place d'un conseil de perfectionnement au printemps 2024 avec des membres de l'équipe pédagogique, des services concernées et des personnes extérieures au master représentant les acteurs de la filière forêt-bois.

L'apprentissage actif

La mise pratique de la pédagogie active de la formation

Pour illustrer la mise en pratique de la pédagogie active, deux exemples sont donnés : un projet transversal baptisé « fil rouge » et le projet R&D.

Le fil rouge qui se déroule sur les deux années du master est le projet emblématique de cette méthode d'apprentissage interdisciplinaire et par projet. Le principe est que chaque promotion de master 1 étudie en groupes un arbre d'une essence particulière en forêt puis prélève cet arbre et caractérise le bois au niveau biologique, physique, chimique, mécanique et du bilan carbone.

Deux promotions de M1 se sont rendues dans les Cévennes pour étudier successivement le cèdre, *Cedrus Atlantica* et le hêtre, *Fagus sylvatica*. Une promotion a étudié le châtaignier *Castanea sativa* dans le Haut-Languedoc. A la fin de l'année, ils présentent leurs résultats à l'équipe pédagogique et au grand public sous forme de poster. En deuxième année, les étudiants, organisés en trois groupes de travail, conçoivent des produits pour valoriser le bois de l'arbre prélevé sous différents aspects : chimie, biomatériaux et construction/menuiserie. Les résultats sont présentés sous forme de conférence et de fiche technique sur le produit conçu et d'une présentation orale devant l'équipe pédagogique et des acteur·ices de la filière forêt-bois. La première promotion de master 2 (promotion Cèdre) a conçu un produit de finition anti-termite et anti-fongique à partir des extractibles des sciures de bois (Fig. 1), un panneau d'ambiance isolant à base d'écorces (Fig. 2), une structure en bois modulable qui permet de se restaurer ou de se reposer (Fig. 3).



Fig. 1 : Présentation des fiches techniques du groupe chimie sur le cèdre



Fig. 2 : Présentation des fiches techniques du groupe biomatériaux sur le cèdre



Fig. 3 : Présentation des fiches techniques du groupe construction/menuiserie sur le cèdre

Ce fil rouge clôture l'année avec un exercice individuel nommé « triple saut » qui mobilise les connaissances interdisciplinaires des deux années de master. Lors d'un premier temps, ou « premier saut », l'étudiant·e découvre un sujet d'une page maximum, puis travaille en autonomie pendant 30 minutes pour fixer les objectifs d'apprentissage qui répondent à la problématique puis présente en vingt minutes son niveau de compréhension du problème devant un jury pluridisciplinaire. Lors du « deuxième saut », l'étudiant·e complète sa réponse en faisant des recherches bibliographiques en autonomie pendant 48h. Enfin, lors du « troisième saut », il.elle restitue ses connaissances mobilisées et acquises devant le jury.

Le projet Recherche & Développement de M2 est un exercice de groupe ou individuel qui stimule les connaissances et la créativité des étudiant·e·s. Pendant six semaines, les étudiant·e·s innovent pour développer un projet de leur choix, à partir d'une idée qu'ils souhaitent développer. Ils·elles peuvent expérimenter et manipuler dans les laboratoires partenaires. Ils développent leur idée au travers de la création d'une entreprise fictive de recherche et développement. Ils·elles présentent leurs résultats sous forme de rapport de cinq pages et d'une vidéo de trois minutes.

Les projets développés par la promotion M2 Cèdre traitent de sujets très divers :

- Bureau de conseil Sylvogeste : « Itinéraire technique avec ceinturage pour accroître la durabilité naturelle »,
- FIO : « Outil de valorisation de la ressource forestière après incendie »,
- InnoV C plié : « Une structure pliable et modulable en bois »,
- Menuis'Up : « Réemployer en mobilier les menuiseries en fin de vie »,
- HOOMA xylochimie : « Valorisation chimique d'une essence méditerranéenne »,
- ARSINOE : « Conseil dans le bois et les biosourcés, dédiée aux structures de l'économie sociale et solidaire ».

L'évaluation de la pédagogie active

Une attention particulière est portée à l'amélioration continue de la formation. Pour cela l'équipe de pilotage a besoin de connaître l'efficacité des pédagogies mises en œuvre, ainsi elle a sollicité un service de l'Université de Montpellier, l'Observatoire de la Transition Pédagogique, coordonné par un spécialiste en sciences de l'éducation, pour évaluer la pédagogie active développée dans le master.

L'évaluation a pour objet de mesurer l'impact des pédagogies mises en œuvre (apprentissage par problème, travaux de groupes et TD/TP) sur l'apprentissage des étudiant·e·s (Coombes et al., 2021). L'étude a été réalisée à l'issue de la première année de master de la première promotion. Elle a reçu un taux de réponse de 79%. L'étude sur la deuxième promotion est en cours.

L'enquête a analysé cinq variables avec l'échelle de Likert (Jebb et al., 2021 et Mellor & Moore, 2014) : la posture de l'enseignant (aide, clarté des objectifs d'apprentissage et retour de l'enseignant), le sentiment d'efficacité personnelle (capacité à suivre les cours, interactions entre étudiant·e·s et avec l'enseignant·e), l'aptitude de l'étudiant·e· (analyser, argumenter, autonomie, curiosité intellectuelle et esprit critique), l'acquisition et la satisfaction personnelle des étudiant·e·s. L'échelle de Likert varie de 1 à 7. Les valeurs 1 à 3 signifient une perception négative, 4, ni positive, ni négative et de 5 à 7, une perception positive. Les résultats sont présentés dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Résultats de moyenne et écart type des différentes pédagogies du master, (Barbe-Asensio D., Ngoua Ondo A., Bächtold M., 2023)

| | | | Apprentissage par problème | Projet en groupe | Exposé, TD, TP |
|------------------------------------|--------------------------------|------------|----------------------------|------------------|----------------|
| Posture de l'enseignant | Aide de l'enseignant | moyenne | 5,96 | 6,44 | 6,22 |
| | | écart-type | 1,01 | 0,64 | 0,93 |
| | Clarté des objectifs | moyenne | 4,42 | 5,38 | 5,22 |
| | | écart-type | 1,07 | 0,97 | 1,33 |
| | Feedback enseignant | moyenne | 6,93 | 6,93 | 6,93 |
| | | écart-type | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| Sentiment d'efficacité personnelle | Suivre les cours | moyenne | 5,75 | 6,19 | 5,67 |
| | | écart-type | 1,06 | 0,69 | 1,12 |
| | Interactions avec l'enseignant | moyenne | 6,25 | 6,25 | 5,99 |
| | | écart-type | 0,88 | 0,96 | 1,08 |
| | Interactions entre étudiants | moyenne | 5,80 | 5,95 | 5,81 |
| | | écart-type | 1,11 | 0,85 | 0,77 |
| | Aptitude | moyenne | 6,21 | 6,32 | 5,97 |
| | | écart-type | 0,81 | 0,76 | 0,72 |
| | Acquisition | moyenne | 6,00 | 6,40 | 6,00 |
| | | écart-type | 1,36 | 0,74 | 0,85 |
| | Satisfaction | moyenne | 5,87 | 6,60 | 5,67 |
| | | écart-type | 1,25 | 0,63 | 0,98 |

On observe pour la posture de l'enseignant·e que toutes les appréciations des étudiant·e·s sont positives dans tous les types de pédagogies mis en œuvre (appréciation supérieure à 5) à l'exception de la clarté des objectifs qui est jugée neutre (valeur de 4,42 en APP). L'équipe de pilotage veillera pour les prochaines années à mieux expliquer les attendus de l'étudiant·e·s, d'explicitier les consignes et le niveau du travail attendu.

Les trois variables évaluées du sentiment d'efficacité personnel et la variable d'acquisition sont plus élevées en projet en groupe en comparaison à l'apprentissage par problème et les exposés, TD/TP, notamment concernant l'aptitude et la capacité à suivre le cours. Ce résultat s'explique par l'autonomie que demande la méthode d'APP, parfois déroutante pour les étudiant·e·s.

La professionnalisation des étudiant·e·s et le lien entre les laboratoires de recherche et le monde industriel

Une attention forte est portée au projet personnel et professionnel de chaque étudiant·e, cela fait l'objet d'une Unité d'Enseignement en master 1. En master 1 et en master 2, les étudiant·e·s en formation initiale et continue partent une fois en laboratoire de recherche et une fois en entreprise lors de deux stages longs de quatre mois environ (seize semaines minimum en M1 et dix-huit semaines en M2). Pour favoriser le lien recherche-entreprise, la formation est ouverte à l'alternance. Les apprenti·e·s réalisent en première année au moins trente semaines en entreprise et en deuxième année au moins trente-quatre.

Des 3 dernières années universitaires écoulées (M1 en 2021/2022, M1 et M2 en 2022/2023) ; un premier bilan peut être fait concernant les stages, l'alternance et les premières embauches.

Les stages

- 70% des étudiant·e·s ont réalisé leur stage dans un laboratoire de recherche, 16% en entreprise et dans un autre type de structure,
- les sujets traités représentent la pluridisciplinarité du master (Fig. 4),
- 77% des étudiant·e·s ont réalisé leur stage en France, 14% à l'étranger et 9% dans les territoires d'Outre-Mer.

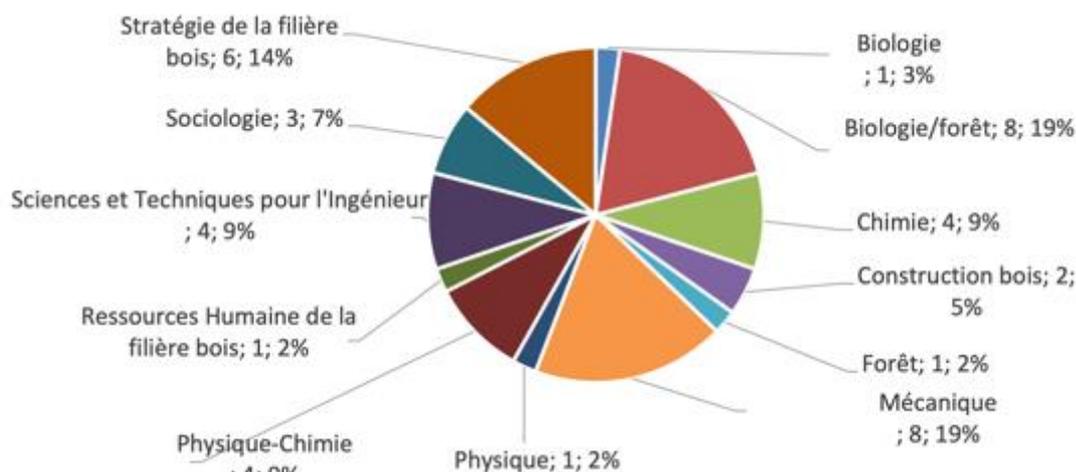


Fig. 4 : Diversité des thèmes traités en stage par les étudiant·e·s

L'alternance

Sur les trois rentrées de master 1, on compte 12 alternant·e·s dans des structures diverses : ONF, réseau des FIBOIS, CERIBOIS, WODOO, Tonnelerie TARANSAUD, SWISSCHRONO, FCBA, CARAYON, BE BCE.

Les premières embauches

Dès la fin des stages, la moitié des étudiant·e·s de la promotion de M2 sortante a trouvé un emploi :

- 4 contrats doctoraux,
- 4 activités salariés dans la filière forêt-bois (association, EPIC ou entreprise)
- 1 création d'entreprise

Il y a eu un abandon d'un étudiant alternant qui a ensuite été embauché par l'entreprise d'alternance et un abandon d'un étudiant en formation initiale.

Ce bon taux d'embauche présage que le master répond aux besoins des acteurs·ices de la filière.

La troisième rentrée en septembre 2023 confirme le caractère exigeant de cette formation (taux de sélection de 18% en 2023), bienveillant (satisfaction des étudiant·es élevée, d'après l'enquête de l'Observatoire de la Transition Pédagogique, 2023) et pertinent au regard d'un réel besoin de la filière forêt-bois (taux d'emploi de 50% à la sortie de stage).

Remerciements

Le master est soutenu par l'Université de Montpellier, la Faculté des Sciences et le LabEx NUMEV. Le master remercie l'ensemble des personnes de l'équipe pédagogique et l'équipe ressources impliquées dans le master, les quatorze laboratoires qui soutiennent le master, les neuf entreprises mécènes ainsi que celles qui versent leur taxe d'apprentissage au master. Ce soutien permet de mettre en place la pédagogie détaillée précédemment.

Références

Barbe-Asensio D., Ngoua Ondo A., Bächtold M. (2023) Étude sur la perception des étudiants de différentes pédagogies actives. Observatoire de la Transformation Pédagogique (OTP), rapport 22p.

Coombes L., Bristowe K., Ellis-Smith C., Aworinde J., Fraser L.K., Downing J., Bluebond-Langner M., Chambers L., Murtag F.E.M., Harding R. (2021) Enhancing validity, reliability and participation in self-reported health outcome measurement for children and young people: a systematic review of recall period, response scale format, and administration modality, *Quality of Life research*, 30:1803–1832

Jebb A.T., Ng V., Tay L. (2021). A review of key likert scale development advances: 1995–2019, *Frontiers in Psychologie*, 12

Kuhn D. (2021). *Problem-based Learning: What Do We Know?* A Cambridge University Press 2021 White Paper, preprint.

Mellor D., Moore K.A. (2014). The Use of Likert Scales With Children, *Journal of Pediatric Psychology*, 39(3) :369-379.

Reverdy C. (2013) Des projets pour mieux apprendre ? Dossier de veille de l'IFÉ, 82

Savery J.R. (2006) Overview of Problem-based Learning: Definitions and Distinctions. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 1(1).

Variabilité du $\delta^{13}\text{C}$ le long du rayon de bois tropicaux de la région amazonienne brésilienne

SOUZA-SILVA Isabela Maria^{1,2}, ARAÚJO Maria Gabriella¹, BATISTA Ana Claudia¹,
MARTINELLI Luiz Antonio¹.

¹ Centre d'Énergie Nucléaire dans l'Agriculture - Université de São Paulo- Brésil

²Laboratoire d'accueil : SilvaTech INRAE-Nancy

isabela_souza@usp.br

Mots clés : analyse isotopique ; traçabilité du bois ; exploitation illégale ; déforestation.

Contexte et objectifs

La forêt tropicale amazonienne, connue pour sa grande biodiversité, joue un rôle essentiel dans le climat mondial en fournissant divers services environnementaux tels que la régulation de l'humidité de l'air par évapotranspiration et recyclage de l'eau, et ce de la côte atlantique aux Andes (Salati et al. 1979). En raison de son importance environnementale élevée, la destruction de la forêt est devenue un sujet de débat national et international, car le remplacement de la forêt par des activités agropecuaires se produit rapidement, de manière incontrôlée et souvent illégale, en raison de la facilité de la saisie des terres (Nepstad et al/ 2014, Matricardi et al. 2020, Ferrante et al. 2021, Silva Junior et al. 2021).

Une étude menée par Valdiones et al. (2022) publiée par le réseau SIMEX, a révélé que, entre août 2020 et juillet 2021, environ 40 % du bois exploité dans la région amazonienne a été extrait de manière illégale, principalement sur des propriétés privées (72 %), suivies par les terres autochtones et les zones de conservation (totalisant 15 %).

Les données obtenues par Brancalion et al. (2018) sur l'Amazonie orientale révèlent la fraude et la corruption dans le secteur forestier de la région, mettant en lumière une surestimation du volume de bois dans les permis d'exploitation forestière et un taux moyen d'"erreur" de 45 % dans l'identification des espèces. Environ treize espèces différentes ont été confondues avec des arbres d'ipê (*Handroanthus*), un bois très prisé sur le marché international.

Dans ce contexte, la réduction effective du commerce de bois illégal se présente comme un défi d'une grande ampleur. Il devient donc essentiel d'établir un système de certification qui intègre des méthodes scientifiques rigoureuses de traçabilité et d'identification précise des espèces forestières exploitées. Ces caractéristiques doivent constituer des exigences obligatoires dans toute proposition de système de certification, dans le but de garantir l'authenticité et la légalité du bois commercialisé (Brancalion et al. 2018).

En considérant la variation des isotopes en réponse aux processus biogéochimiques et physiques, reflétant l'environnement dans lequel ils sont présents, l'utilisation des isotopes peut devenir un outil solide et applicable dans la lutte contre l'exploitation illégale du bois (Deleens et al. 1993, Fry 2006, Costa et al. 2019). Pour comprendre la dynamique de la signature isotopique du bois et son potentiel en matière de traçabilité, il est essentiel de prendre en compte certains points cruciaux. Cela inclut la variation entre les cernes de croissance (inter-radial), les variations entre les arbres dans une même localité (intra-local, ces dernières pouvant être influencées par des facteurs tels que les conditions spécifiques du sol) et la variation entre différentes localités géographiques (inter-local). Celle-ci constitue une autre source

significative de variation dans les signatures isotopiques du bois et est souvent liée aux différences climatiques et géologiques propres aux différentes régions.

À la lumière de ces considérations, notre travail se propose d'analyser la variation du rapport isotopique entre le carbone 12 et le carbone 13 aule long du rayon des espèces forestières de valeur commerciale de la région amazonienne brésilienne.

Matériel et méthode

Environ 50 espèces ont été utilisés, totalisant environ 250 individus forestiers provenant de différentes localités de la région amazonienne brésilienne. Pour permettre les analyses isotopiques du carbone, une tranche transversale de 1,50 cm de largeur sur 2,5 mm d'épaisseur a été prélevée à la base du tronc de chaque individu. Sur chaque tranche, cinq échantillons de 2 cm de longueur ont été prélevés, représentant la moelle, le duramen et l'aubier (Fig. 1). La différence statistique entre les points a été déterminée en utilisant la distance de Cohen (d). Les analyses ont été réalisées sur le logiciel Rstudio.

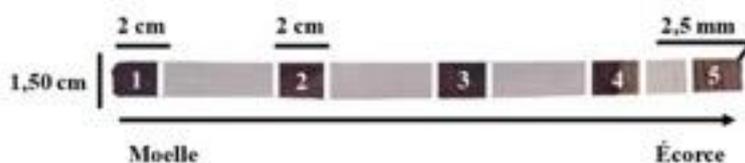


Fig. 1 : Barret du rayon du disque de bois en coupe transversale, montrant la section de la moelle à l'écorce. La tranche mesure 1,50 cm de largeur et 2,5 mm d'épaisseur. Les pièces numérotées de 1 à 5 représentent les échantillons prélevés pour les analyses, avec des dimensions de 1,50 cm de largeur et 2 cm de longueur.

Résultats et discussion

Parmi tous les individus, la moyenne de $\delta^{13}\text{C}$ était de $-28,3 \pm 1,5\%$, avec une grande variation de 9‰ (minimum de $-33,5\%$ et maximum de $-24,8\%$), lors de l'étude de deux espèces forestières de la région amazonienne. Hietz et al (2005) ont montré une valeur de $-29,03\%$ pour l'espèce *Cedrela odorata* et $-28,11\%$ pour *Swietenia macrophylla*. Comme nos données présentent une forte variation d'espèces dans différentes localités, une grande variation de la signature isotopique était attendue.

Dans le rayon, le schéma émergent ressemble à une forme de cloche, avec $\delta^{13}\text{C}$ devenant moins négatif à 25 ($-28,0 \pm 1,60\%$), 50 ($-27,9 \pm 1,47\%$) et 75 ($-28,2 \pm 1,37\%$) (Fig. 2). Bien que le $\delta^{13}\text{C}$ soit significativement moins négatif à ces points qu'au centre de l'arbre '0' ($-28,5 \pm 1,72\%$) et près de l'écorce '100' ($-28,8 \pm 1,22\%$), la différence n'est que de 0,9‰. Selon le test de la distance de Cohen (d), la plus grande taille d'effet a été considéré comme faible ($d \leq 0,37$), suggérant qu'il n'y a pas de différence statistique entre les moyennes. Ohashi et al (2016), en évaluant la variabilité intra-radiale du $\delta^{13}\text{C}$ chez les espèces forestières tropicales, ont montré une variation inférieure à 1‰ entre les cernes de croissance. Ce dernier point semblerait indiquer qu'il soit possible d'utiliser la moyenne de toutes les valeurs ou d'une valeur spécifique.

Conclusion

La traçabilité du bois dans la région amazonienne demeure un défi important. Les isotopes de carbone se révèlent prometteurs pour la création d'un outil qui contribue à élucider les crimes liés à l'exploitation illégale. Le fait de n'avoir pas observé une grande variation isotopique entre les différents points le long du rayon rend l'outil plus fiable. Par conséquent, bien que de nombreux défis persistent, l'analyse des isotopes reste un outil essentiel pour la traçabilité du bois, fournissant des informations cruciales sur l'origine et les caractéristiques des arbres.

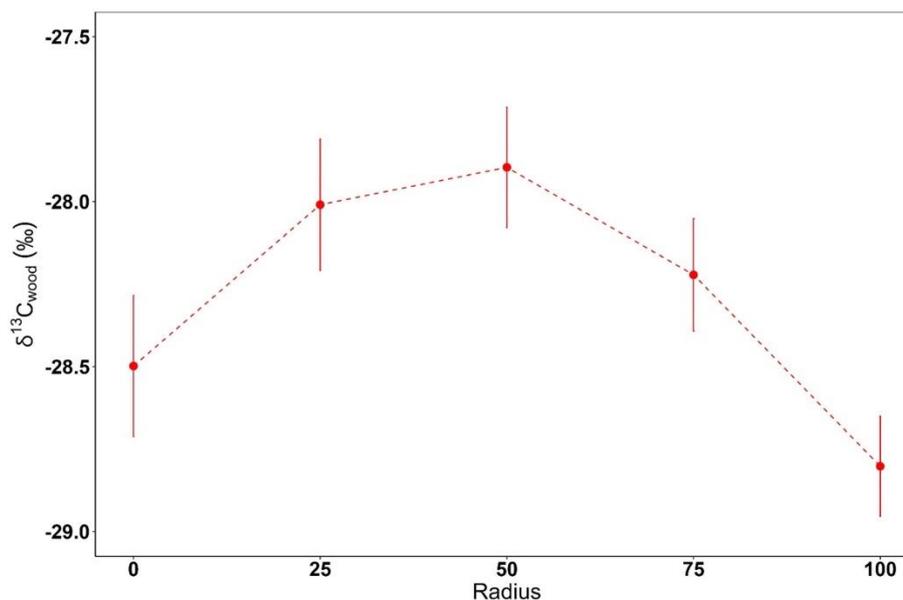


Fig. 2 : Variation moyenne radiale de $\delta^{13}\text{C}$ dans le bois regroupant les valeurs par spécimens et sites. Les barres verticales rouges indiquent les intervalles de confiance à 95 %.

Références

Brancalion PHS, Almeida DRA, Vidal E, Molin PG, Sontag VE, Souza SEFX, Schulze MD (2018) Fake legal logging in the Brazil Amazon. *Applied Ecology*, 4 (8): 1-7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1192>.

Costa FJV, Sena-Souza JP, Nardoto GB (2019) Determinação da origem geográfica de vestígios utilizando isótopos estáveis: base científica e potencial de uso no Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Policiais*, 10 (1): 15-54.

Ferrante L, Andrade MBT, Fearnside PM (2021) Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation. *Land Use Policy*, 108, 105559. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105559>.

Fry B (2006). *Stable Isotope Ecology*. Springer, v. XII. New York.

Hietz P, Wanek W, Dünisch O (2005) Long-term trends in cellulose $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, 25: 745-752.

Matricardi EAT, Skole DL, Costa OB, Pedlowski, MA, Samek JH, Miguel EP (2020) Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science*, 369: 1378-1382. <https://doi.org/10.1126/science.abb3021>.

Ohashi S, Durgante F M, Kagawa A, Kajimono T, Trumbore S E, Xiaomei X, Ishizuka M, Higuchi N (2016). Seasonal variations in the stable oxygen isotope ratio of wood cellulose reveal annual rings of trees in a Central Amazon terra firme forest. *Oecologia*, 180: 685–696. <https://doi.org/10.1007/s00442-015-3509-x>

Salati E, Dall'Olio A, Matsui E, Gat J (1979). Recycling of water in the Amazon basin: an isotope study. *Water Resour. Res.*, 15 (5): 1250–1258. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01250>.

Valdiones A P, Vianna A, Cardoso dos Santos B D, Damasceno C, Souza Jr. C, Cardoso D, Costa J N, Batista L A S, Lentini M, ; Andrade M, Pacheco B, Carvalho T, Silgueiro V F (2022) Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira (Simex): Mapeamento da exploração madeireira na Amazônia –août 2020 à juillet 2021.

Qualification *in-situ* de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive

HAFSA Wael¹, ANGELLIER Nicolas², TAKARLI Mokhfi²,
POP Ion Octavian²

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, Marseille, 13453, France

² Univ. Limoges, GC2D, EA 3178, F-19300 Egletons, France

wael.hafsa@univ-amu.fr

Mots clefs : CSI ; CND ; méthode inverse ; résistivité électrique ; teneur en eau

Contexte et objectifs

Face à la demande des maîtres d'ouvrage en techniques de contrôle non destructif (CND) permettant d'établir un diagnostic optimal et fiable de l'état des structures en bois, ce papier décrit une approche électrique basée sur la mesure de la résistivité électrique permettant de qualifier la teneur en eau de ces structures. Simple d'utilisation et relativement peu coûteuse, cette technique présente toutefois quelques verrous liés à la possibilité de réaliser un Contrôle de Santé Intégré (CSI) ou Structural Health Monitoring (SHM) en anglais. Des facteurs expérimentaux, autres que les paramètres explicatifs liés au matériau bois, influencent d'une manière considérable la mesure de la résistance électrique du bois en injectant un courant continu. Des essais préliminaires montrent des difficultés liées aux hautes résistivités, aux grandes lignes de courant et aux problèmes de contact entre les sondes et le matériau bois. Au regard de ces observations, ce papier présente les résultats des travaux effectués pour évaluer certains de ces facteurs expérimentaux, et décrit une analyse bibliographique et une stratégie expérimentale permettant respectivement de calibrer les données mesurées et de développer la tête de mesure. Les performances de cette technique, mixant mesures résistives et inversion numérique, ont été évaluées sur une poutre *in-situ*.

Type et classification des données bibliographiques : modélisation statistique

Nous présentons une approche statistique qui traite les données de résistance électrique trouvées dans la littérature afin d'identifier les différents paramètres qui affectent la mesure. L'étude bibliographique concerne 82 résineux et 27 feuillus. Les mesures des résistances sont répertoriées selon l'essence du bois, sa famille, son origine géographique, son état thermo-hydrique et la direction d'injection du courant par rapport à l'alignement des fibres (L, R et T). Les mesures collectées et représentées sur la Fig. 1 ont été réalisées sur du bois vert, des éléments en bois *in-situ* ou conditionnés et contrôlés en laboratoire.

Les données couvrent une large gamme de teneurs en eau allant de 2 jusqu'à 260% qui correspondent respectivement à des résistances électriques de $1.14E+14$ à 231Ω avec une lacune de données en dessous de 7%. Cette limite correspond à la limite inférieure définie par la norme EN 13183-2 (2002) décrivant le mode opératoire des humidimètres basés sur la mesure de la résistance électrique. En-dessous du point de saturation des fibres (environ 30%), une relation log-linéaire existe entre la résistance et la teneur en eau. Entre 7 et 30 % et à une température constante, Stamm (1927) a montré que la relation entre le logarithme de la teneur en eau (w) et le logarithme de la résistance (R) est une relation linéaire qui s'écrit selon (1) où k_w et C_1 sont deux constantes matériau :

$$\ln R = k_w \ln w + C_1 \quad (1)$$

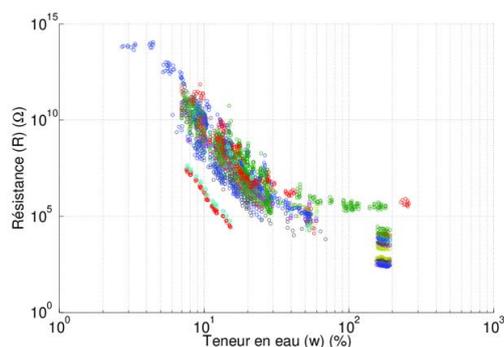


Fig. 1 : Données bibliographiques des essais expérimentaux de la résistance électrique en fonction de la teneur en eau du bois

Afin de modéliser les données bibliographiques et d'évaluer la dispersion des mesures de résistances pour chaque teneur en eau, nous proposons une approche probabiliste. Cette analyse est réalisée dans le but d'identifier le poids des paramètres qui conditionnent la mesure. Pour chaque valeur de teneur en eau, nous supposons que la résistance électrique est une variable aléatoire discrète qui suit une loi de probabilité quelconque caractérisée par des paramètres inconnus. Pour calculer les meilleures estimations des paramètres du modèle à partir de données observées, nous testons plusieurs lois (Normale, Weibull et Gamma) et nous employons la technique du maximum de vraisemblance permettant de mesurer l'adéquation entre la distribution des résistances observées et la loi de probabilité utilisée. Notre choix porte sur la loi Normale qui se caractérise par une symétrie, une nette tendance centrale et une flexibilité pour modéliser des observations issues de plusieurs événements aléatoires indépendants. Ceci est tout à fait en cohérence avec la mesure de la résistance électrique qui se caractérise par plusieurs paramètres explicatifs expérimentaux (Vermaas, 1975). La Fig. 2a montre les résultats pour des teneurs en eau dans le domaine hygroscopique.

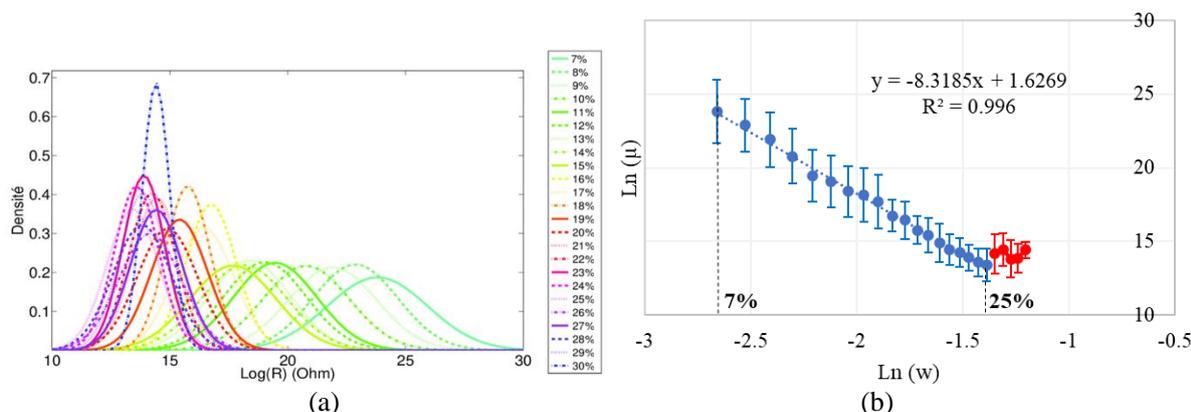


Fig. 2 : a) Fonctions de densité pour les données bibliographiques de résistance électrique : b) Evolution de l'espérance de la loi normale dans le domaine hygroscopique

Les résultats montrent que la dispersion des mesures de résistance diminue lorsque la teneur en eau augmente. Cela est dû aux faibles valeurs de résistances facilitant la circulation du courant électrique et améliorant la qualité de la mesure. De plus, l'influence de certains paramètres (tels que la densité ou l'orthotropie du matériau) sur les mesures de résistances est moins significative à des taux d'humidité élevés. L'espérance de la résistance estimée (notée μ) pour les différentes teneurs en eau dans le domaine hygroscopique, est présentée dans la Fig. 2b. La log-linéarité est bien vérifiée jusqu'à 25 %. Au-delà, la perte de cette linéarité peut être expliquée par le fait que certaines essences ont atteint le PSF. Sur la partie linéaire, les deux constantes de l'équation (1) ont été identifiées avec $C_1 = 1.63$ et $k_w = -8.32$.

Etude paramétrique : résistivité homogène et relation avec la teneur en eau

Nous nous intéressons à l'échelle laboratoire où nous utilisons des échantillons homogènes en teneur en eau afin d'identifier l'effet de certains paramètres explicatifs. L'étude paramétrique est réalisée en utilisant 23 échantillons en Douglas-fir cubiques de dimensions 50x50x50 mm³ usinés selon les directions d'orthotropie et conditionnés à 4 niveaux de teneurs en eau (Fig. 3).

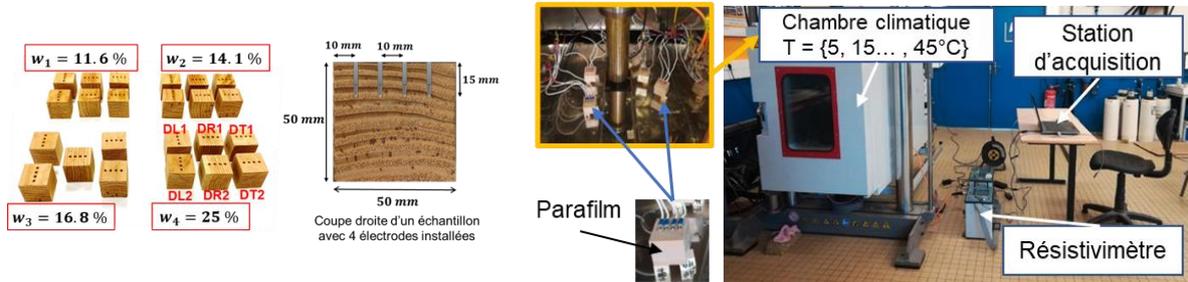


Fig. 3 : Eléments en bois testés et protocole expérimental à l'échelle laboratoire

Ces dimensions spécifiques sont un compromis permettant d'installer 4 électrodes espacées de 10 mm. Ce choix de géométrie ne remettra pas en cause l'application de la méthode proposée à un élément de structure. De plus, afin de minimiser la variabilité entre les échantillons, ils sont extraits de la même planche. Chaque ensemble d'échantillons correspondant à un niveau de teneur en eau, est placé dans la chambre climatique. Les mesures sont effectuées sur les 3 directions d'injection L, R, T, et ce, à 5 niveaux de températures différentes 5, 15, 25, 35 et 45°C. Chaque échantillon est recouvert par un parafilm afin de conserver sa teneur en eau ce qui est vérifié par des pesées effectuées avant et après l'expérience. Trois configurations d'électrodes (α , β et γ) sont également testées.

L'approche numérique consiste à développer un modèle direct en prenant en compte la géométrie réelle des électrodes (des cylindres parfaitement conducteurs) et des volumes étudiés. Un modèle isotrope est considéré, cette hypothèse étant une première approche simplifiée pour des échantillons de petites dimensions avec une homogénéité en termes de distribution de la teneur en eau. Cette approche numérique (Fig. 4) repose donc sur deux étapes principales : (i) la modélisation par éléments finis (MEF), et (ii) l'injection électrique s'appuyant sur l'analogie thermique-électrique.

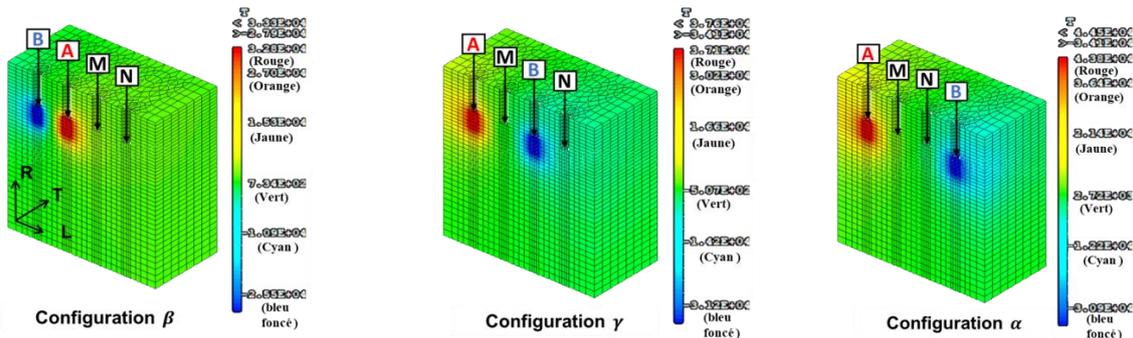


Fig. 4 : Injection électrique et multiplexage pour les configurations β , γ et α ($\rho = 1000 \Omega.m$)

Afin de remonter aux valeurs des résistivités, les résultats de résistances sont multipliés par le facteur géométrique déterminé numériquement et correspondant à chaque configuration. Les résultats sont présentés dans la Fig. 5. Afin de présenter un modèle empirique (Carll et TenWolde, 1996) sur la base de ces mesures, une loi de passage est établie, définie pour une gamme de teneurs en eau entre 7 et 30 % et calibrée en fonction de la température comme suit :

$$\ln w = -1.66 \cdot 10^{-1} \ln \rho - 5.83 \cdot 10^{-3} T + 2.14 \cdot 10^{-1} \quad (2)$$

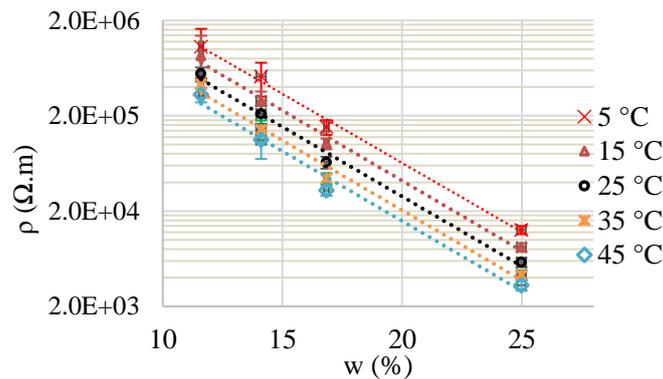


Fig. 5 : Résistivité (ρ) en fonction de la teneur en eau (w) à différentes températures

Stratégie pour l'état hydrique in-situ à l'échelle structurale

Dans les structures en bois, nous rencontrons des assemblages mixtes bois-métal. La présence d'un taux d'humidité élevé au niveau de cette zone représente un facteur aggravant qui affecte leur performance. Le retrait gonflement peut également entraîner des fissurations. Par conséquent, la connaissance du taux d'humidité représente un intérêt pour éviter ces désordres. L'étude expérimentale est réalisée sur un poteau intermédiaire « face avant » en Douglas-fir de section 230x310 mm², soutenant une charpente en bois (Fig. 6).

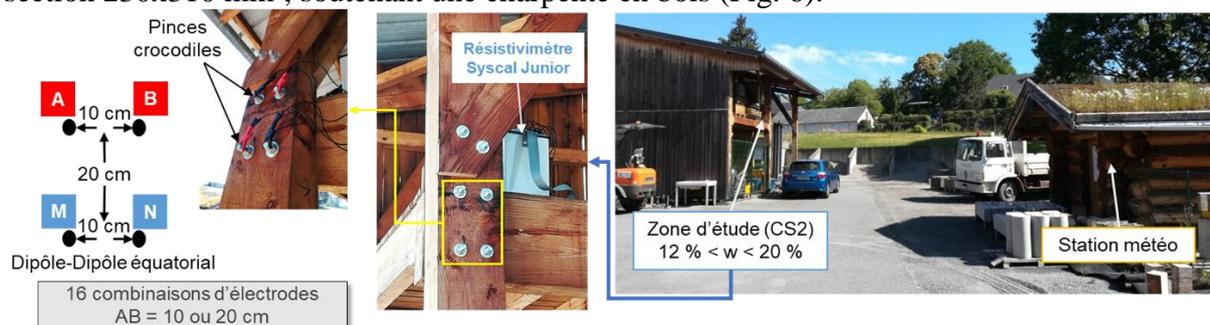


Fig. 6 : Zone d'étude in-situ et station météo

La structure est en classe de service 2 (CS2) avec une teneur en eau variant entre 12 et 20 %. Un suivi des conditions climatiques est assuré pendant un mois via une station météo installée au voisinage de la zone étudiée. En utilisant un résistivimètre Syscal Junior, quatre mesures sont réalisées à 1, 7, 14 et 28 jours. La solution proposée repose sur l'utilisation des 4 organes d'assemblage (diamètre 18 mm) comme électrodes, en installant des pinces crocodiles pour l'injection du courant et la mesure de la tension. Les électrodes sont espacées de 10 cm horizontalement et de 20 cm verticalement. Grâce au multiplexage, 16 combinaisons d'électrodes basées sur le dispositif dipôle-dipôle (DD) équatorial sont testées. Ces combinaisons sont classées en deux catégories en fonction de la distance (d) qui sépare les électrodes d'injection : 8 combinaisons avec $d = 10$ cm ; 8 combinaisons avec $d = 20$ cm.

La Fig. 7a présente les variations de l'humidité relative (HR) et de la température (T) collectées pendant le mois d'étude. Une première analyse de ces données permet de distinguer deux périodes climatiques : une avec HR et T variables et une autre avec HR élevée et T faible. Durant ce mois, nous observons une variation importante de la température entre 0.4 et 28.4 °C avec une température moyenne de 11°C. Nous remarquons aussi que HR varie entre 21.4 et 96 % avec une moyenne de 77%. La Fig. 7b présente la répartition des mesures de HR tout au long de la période d'étude et montre que 76 % des valeurs sont supérieures à 70 %.

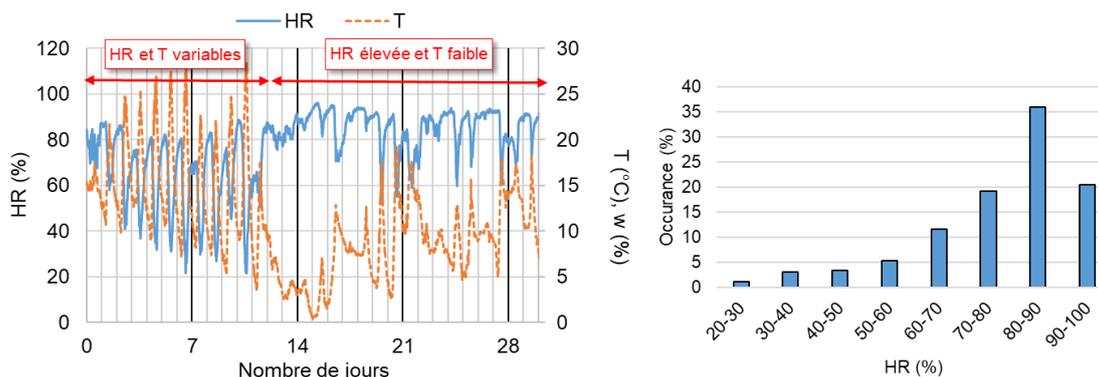


Fig. 7 : a) Suivi des conditions thermohydriques ; b) Répartition des données HR

Un modèle numérique reproduisant la configuration expérimentale est développé en tenant compte de la géométrie des électrodes et du volume du poteau (Fig. 8a). Nous développons deux maillages distincts : un premier qui définit la discrétisation des électrodes et un deuxième qui caractérise le volume du poteau modélisé par un parallélépipède rectangle de dimensions 930x230x310 mm³. L'injection électrique est simulée en prenant en compte le multiplexage des électrodes dans différentes configurations. En posant comme hypothèse l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau dans la zone investiguée, deux facteurs géométriques sont déterminés : $k_{10} = 8.07$ m (configurations où $d=10$ cm) ; et $k_{20} = 0.45$ m (configurations où $d=20$ cm).

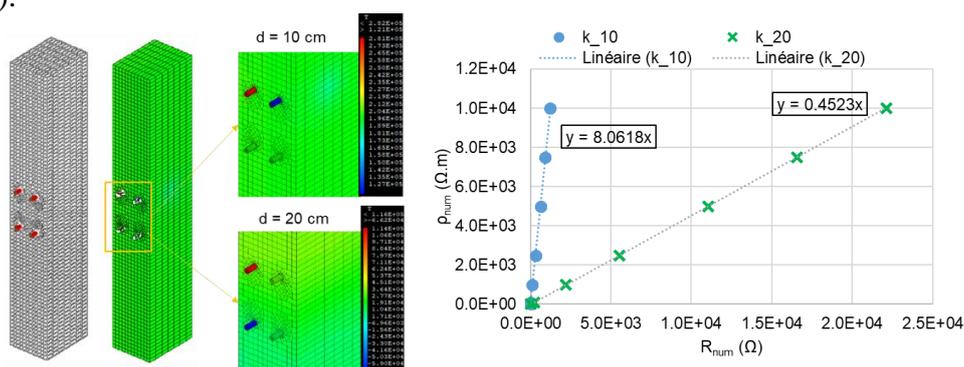


Fig. 8 : (a) Modèle numérique et multiplexage pour le poteau ($\rho=104$ Ω.m) ; (b) Facteurs géométriques numériques des configurations testées sur le poteau

Après minimisation des écarts entre les résistances expérimentales et numériques, les résultats (Fig. 9) montrent 2 niveaux de mesures cohérents avec les configurations d'électrodes et la capacité du modèle à dissocier ces niveaux liés aux facteurs géométriques évalués numériquement. Cependant, une dispersion des données expérimentales est observée, pouvant être expliquée par l'hétérogénéité du matériau vues les distances entre les électrodes. Pour cela, nous décidons de nous focaliser sur la configuration avec $d = 10$ cm.

Le Tab. 1 résume les résultats de résistivités calculées, leurs écarts types correspondant aux différentes configurations testées, la moyenne de la température obtenue durant 1h avant la prise de la mesure, et la teneur en eau calculée avec l'équation (2). Afin de calibrer les mesures par rapport à la température, nous avons recours aux résultats de l'étude à l'échelle laboratoire.

Les données climatiques moyennes sont utilisées pour déterminer la teneur en eau à l'équilibre selon les courbes d'équilibre hygroscopique du bois utilisées dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1/NA 2010). Ces conditions correspondent à une teneur en eau moyenne $w_{AFNOR} = 16\%$. Néanmoins, les résultats montrent un niveau supérieur à w_{AFNOR} (sauf dans le cas de la mesure à 14 jours). Les niveaux élevés de teneurs en eau peuvent être également expliqués par la

répartition des données HR. Nous observons également une dispersion élevée des écarts types des mesures de teneurs en eau due à la résistivité hétérogène dans le poteau, ce qui montre la limite de l'hypothèse de l'homogénéité de la résistivité dans le cas où les électrodes sont éloignées. Cependant, les résultats sont encourageants montrant l'applicabilité, en termes d'évaluation globale de l'état hydrique.

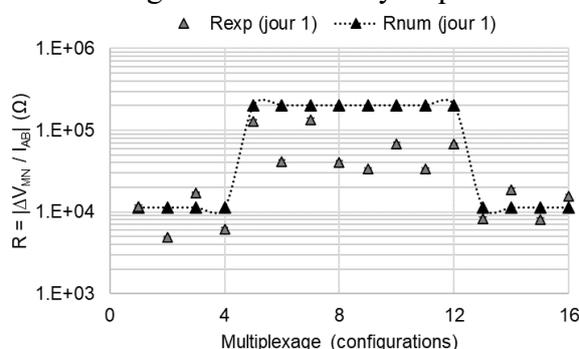


Fig. 9 : Résistances expérimentales et numériques (mesures à 1 jour)

Tab. 1 : Evaluation des résistivités, leurs écarts types, températures et teneurs en eau

| Jour | ρ ($\Omega.m$) | σ , (%) | T ($^{\circ}C$) | w (%) |
|------|-----------------------|----------------|-------------------|-------|
| 1 | 9.15E+04 | 46.6 | 23.75 | 16.1 |
| 7 | 3.20E+04 | 62.2 | 18.75 | 19.8 |
| 14 | 4.17E+05 | 26.7 | 4.44 | 14.04 |
| 28 | 6.13E+04 | 21 | 15.39 | 19.4 |

Conclusion et perspectives

L'étude statistique réalisée a permis de traiter et d'analyser les données bibliographiques, afin de distinguer des variables expérimentales telles que la configuration des électrodes, la température et des variables inhérentes liées aux propriétés du matériau telle que l'anisotropie et la teneur en eau. Nous avons mis en place une étude paramétrique pour différents niveaux de températures. Au regard des résultats, une relation a été établie pour évaluer la résistivité électrique en prenant en compte la configuration des électrodes, la variation de la température pour une gamme allant de 5 à 45 $^{\circ}C$, et pour des teneurs en eau de 11.6 à 25 %. Un protocole expérimental pour la mesure de la résistivité/teneur en eau a été mis en place sur un poteau assurant la stabilité d'une charpente. L'injection est réalisée cette fois-ci par l'intermédiaire des organes d'assemblage qui jouent le rôle des électrodes. Les résultats obtenus ont montré la capacité des mesures résistives multiplexées à différencier les niveaux de résistance en fonction de l'écartement entre les éléments d'assemblage (les électrodes). Les mesures ont aussi relevé l'impact de la température ambiante sur la résistance électrique. Afin de corriger cette perturbation induite par la température, nous avons utilisé les résultats de l'étude paramétrique réalisée à l'échelle laboratoire. Malgré une courte période d'essai (1 mois), ces résultats ont montré le potentiel de cette stratégie expérimentale pour la surveillance de l'état hydrique des ouvrages en service. Bien entendu, cette stratégie mérite d'être approfondie afin d'aller vers le monitoring pour différentes classes de service.

Références

- Carll C., TenWolde A. (1996) Accuracy of wood resistance sensors for measurement of humidity. *Journal of Testing and Evaluation* 24 (3): 154-60. <https://doi.org/10.1520/JTE11296J>
- Stamm A.J. (1927) The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content. *Industrial & Engineering Chemistry* 19 (9): 1021–1025.
- Vermaas H.F. (1975) Experimental variables affecting the measurement of the DC resistance of wood. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 29(4), 140-144.

Développement de revêtements métalliques et céramiques sur le bois pour sa protection au feu et aux termites

PODGORSKI Laurence¹, DENOIRJEAN Alain²

¹Institut Technologique FCBA, Allée de Boutaut, 33028 Bordeaux Cedex

²IRCER, Université de Limoges

Laurence.podgorski@fcba.fr

Mots clés : bois ; céramique ; métal ; revêtement ; feu ; termites ; projection thermique.

Contexte et objectifs

Les solutions de projection thermique peuvent déposer sur le bois une couche de métal seule (Nejad *et al.* 2013) ou en combinaison avec une couche de céramique (Podgorski *et al.* 2020). Les caractéristiques des matériaux projetés permettent d'envisager l'apport de fonctionnalités au bois telles qu'ignifugation et barrière aux termites. Ces solutions peuvent donc répondre aux attentes d'innovation de la filière bois. Le projet MéCéBois, financé par le Conseil régional de Nouvelle-Aquitaine, avait pour ambition de favoriser l'innovation au service de la filière bois tout en ouvrant de nouveaux débouchés pour la projection thermique de céramiques/métaux du bassin limousin.

Matériels et méthodes

L'essence de bois utilisé est le pin sylvestre. Les éprouvettes fabriquées répondent aux critères de EN 927-6. Toutes les éprouvettes ont reçu une sous-couche métallique, indispensable à l'adhérence d'une couche de céramique. Des pré-essais avec du cuivre en sous-couche avaient préalablement montré la faisabilité des dépôts métalliques/céramiques sur le bois (Podgorski *et al.* 2020). Dans le projet MéCéBois, le laiton a été choisi comme sous-couche métallique car plus économique que le cuivre. Trois céramiques oxydes (fournies par Saint Gobain) ont été déposées sur les bois revêtus de laiton :

- Alumine Al_2O_3 supra
- Alumine/zircone Al_2O_3/ZrO_2 supra
- Alumine/dioxyde de titane Al_2O_3/TiO_2 supra

Des éprouvettes avec dépôt de laiton et sans dépôt de céramique ont été également réalisées.

Les traitements ont été réalisés dans les locaux de l'IRCER par projection thermique. Les métaux et céramiques, sous la forme de cordon (Flexicord), sont introduits dans le pistolet Masterjet (matériel Saint Gobain) raccordé électriquement et dont le principe est schématisé en Fig. 1.

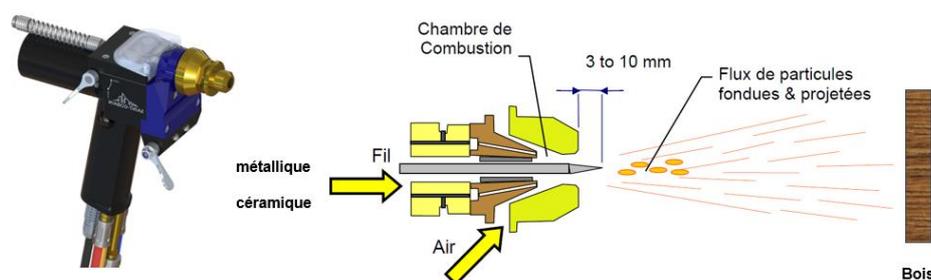


Fig. 1 : Principe de fonctionnement du pistolet Masterjet utilisé pour les dépôts sur bois.

Des essais préliminaires ont permis de retenir les paramètres de traitement figurant dans le Tab. 1.

Tab.1 : Paramètres de traitement retenus

| Matériau du revêtement | Laiton | Al ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ | Al ₂ O ₃ /TiO ₂ |
|--|--------|--------------------------------|--|--|
| Vitesse robot (m/s) | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Pas entre trajectoires (mm) | 50 | 3 | 3 | 3 |
| Nombre de trajectoire horizontale | 6 | 56 | 56 | 56 |
| Nombre de cycle | 12 | 30 | 30 | 11 |
| Distance de tir (mm) | 200 | 100 | 95 | 110 |
| Débit air jet (% commande refroidissement) | 15 | 25 | 25 | 25 |
| Vitesse d'avance du fil/cordon (cm/min) | 200 | 40 | 75 | 75 |
| Débit d'oxygène (l/min) | 48 | 65 | 65 | 60 |
| Débit d'acétylène (l/min) | 65 | 75 | 75 | 70 |

Résultats et discussion

Les dépôts procurent aux éprouvettes de bois des surfaces opaques de couleurs différentes. Le laiton confère une teinte dorée. L'alumine Al₂O₃ Supra apporte une teinte blanche, Al₂O₃/ZrO₂ Supra une teinte gris clair et Al₂O₃/TiO₂ Supra une teinte gris foncé (Fig. 2). L'épaisseur totale moyenne (laiton + céramique) est de 380 µm (dont 228 µm pour le laiton).

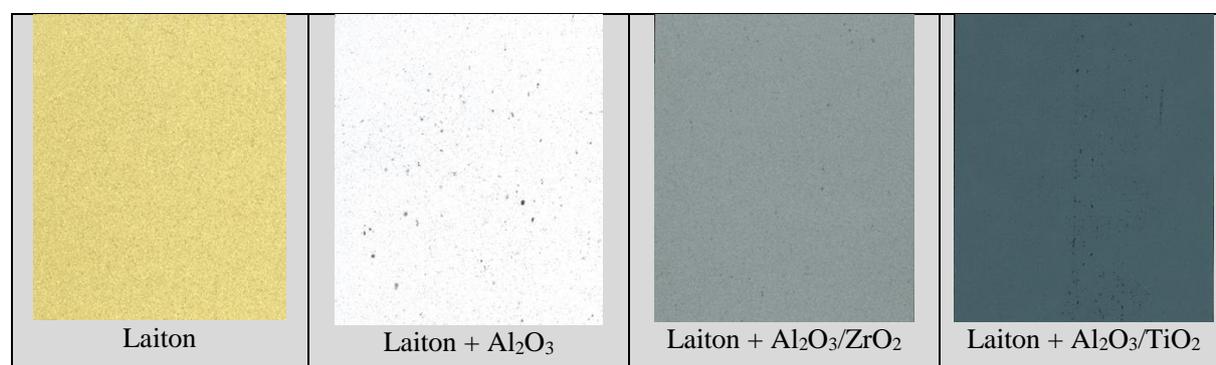


Fig.2 : Aspect global des surfaces.

Après réalisation des dépôts, des décollements des revêtements ont parfois été constatés au niveau des arêtes vives des éprouvettes. Ces décollements ont pu être très fortement réduits dans une deuxième phase en arrondissant les arêtes des éprouvettes.

Les dépôts métalliques/céramiques ont conduit à un tuilage quasi systématique des éprouvettes. Cette déformée a été estimée en mesurant la flèche maximale au centre de l'éprouvette. Les résultats montrent que plus la quantité de matière déposée sur le bois était grande, plus la flèche était importante (Fig. 3).

Des tests de perméabilité à l'eau liquide (EN 927-5) ont montré que ces dépôts laiton et céramiques sur bois présentent des absorptions d'eau très élevées (en moyenne de l'ordre de 2 825 g/m²) et avec des écarts plus larges que ceux obtenus par des finitions organiques (Fig. 4), ce qui témoigne d'hétérogénéités des dépôts. Compte-tenu de ces écarts, on peut conclure que l'absorption d'eau est globalement équivalente pour les 4 typologies de revêtements métalliques et céramiques étudiées. Cette forte absorption d'eau est problématique dans une

optique d'utilisation des revêtements métalliques et céramiques pour la protection du bois aux intempéries. Ces typologies de revêtements ne peuvent protéger le bois des reprises d'eau et ne peuvent donc pas assurer le rôle rempli par les finitions traditionnelles bien plus imperméables.

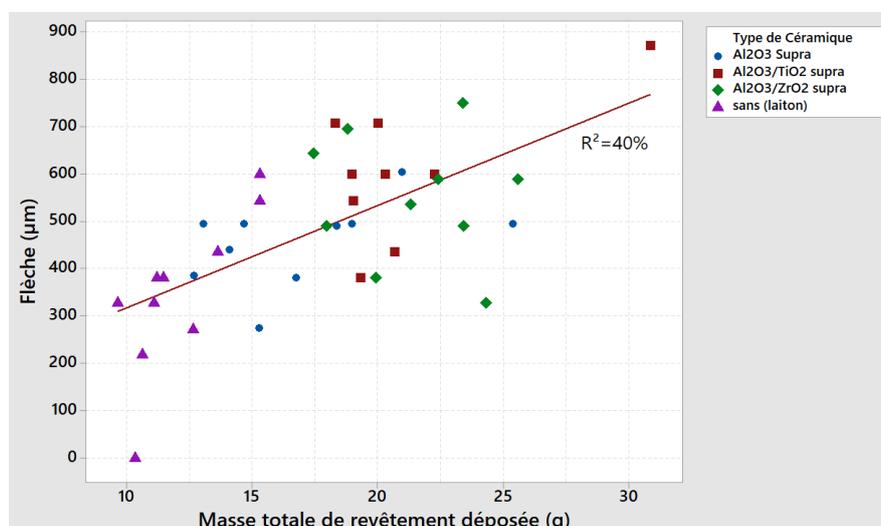


Fig. 3 : Déformation des éprouvettes (flèche) en fonction de la masse de revêtement (céramique + laiton) déposée.

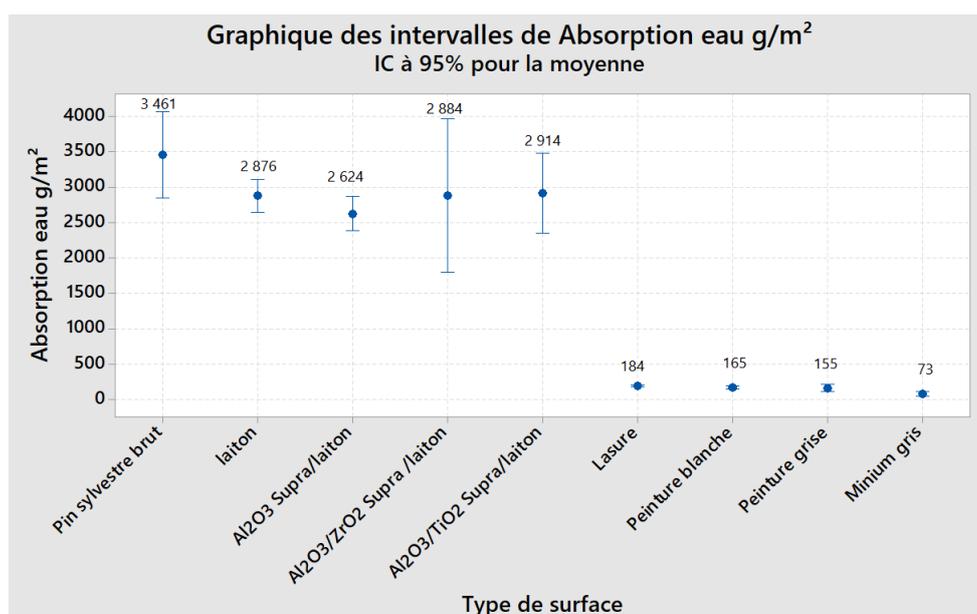


Fig. 4 : Absorption d'eau des revêtements (EN 927-5).

La résistance des revêtements aux termites a été évaluée en adaptant la méthode EN 118 à la nature du matériau et à la taille des éprouvettes disponibles. Les termites souterrains utilisés pour le test adapté sont du genre *Reticulitermes* et de l'espèce *grassei*. Les dispositifs en verre contenaient 150 individus. Pour chaque revêtement, six répliques ont été réalisés sur deux éprouvettes revêtues de céramique (Fig. 5).

Aucun termite n'a pu traverser les revêtements en essai. Les insectes sont donc probablement morts de faim lors des 8 semaines d'exposition. On attribue l'efficacité des traitements vis-à-vis des termites à la forte dureté des revêtements, évaluées par le pendule de Persoz (Fig. 6).

Des dépôts sur de plus grandes surfaces (contreplaqués 1500 mm x 500 mm) ont pu être réalisés grâce à l'appui du Centre d'Ingénierie en Traitements et Revêtements de surface Avancés de Limoges.



Fig. 5 : Exemple de dispositifs sur éprouvettes revêtues de laiton.

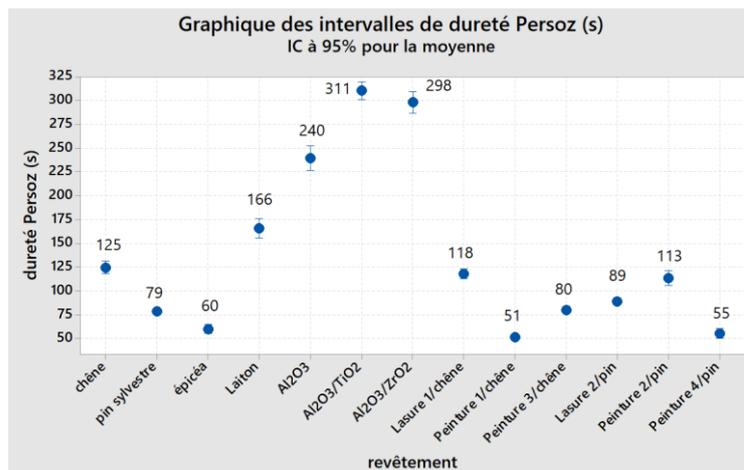


Fig. 6 : Dureté Persoz (moyenne et IC 95%) des revêtements métallique et céramiques en comparaison avec d'autres surfaces de bois nus ou revêtus de finitions traditionnelles.

Des tests de réaction au feu au SBI (Fig. 7) ont été réalisés sur des contreplaqués d'épicéa revêtus de laiton seul et de laiton + Alumine Zircone Al_2O_3 ZrO_2 (AZ) en comparaison de contreplaqués d'épicéa témoin (CP épicéa).



Fig. 7 : Panneau Alumine Zircone à la fin des essais SBI de réaction au feu.

L'ajout des deux revêtements (laiton, laiton + AZ) permet d'améliorer les performances énergétiques de réaction au feu en termes de vitesse de dégagement d'énergie (FIGRA) et quantité totale d'énergie dégagée (THR) comme le montre la Fig. 8. Comme le contreplaqué témoin, les 2 revêtements conduisent à l'obtention d'un classement de type D, cependant très proche du classement C. Le revêtement alumine zircone AZ permet d'améliorer légèrement les résultats par rapport au revêtement en laiton.

Concernant les performances fumigènes (Fig. 9), les revêtements sont légèrement déclassant par rapport au bois non revêtu. Le classement pour le laiton est de type s1 comme pour le bois non revêtu, alors qu'il est de type s2 pour le revêtement AZ.

En conclusion, les dépôts testés conduisent donc à des classements de type D-s1 ou s2, d0.

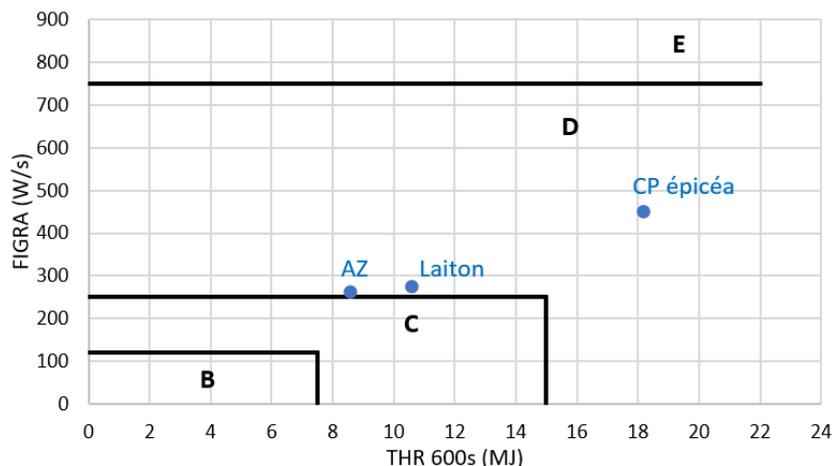


Fig. 8 : Contribution énergétique (vitesse de développement du feu « FIGRA » et quantité totale « THR »

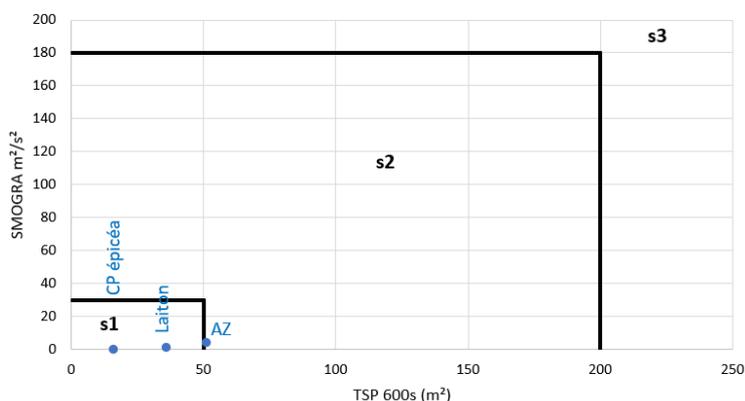


Fig. 9 : Contribution fumigène (vitesse de développement de la fumée « SMOGRA » et quantité totale « TSP ».

Conclusion et perspectives

Le projet MéCéBois a permis la réalisation de dépôts métalliques et céramiques sur des éprouvettes de bois (pin sylvestre) et des contreplaqués d'épicéa par projection thermique. Les dépôts masquent totalement le veinage du bois et confèrent au matériau des esthétiques originales : aspect doré pour la sous-couche métallique en laiton, aspect blanc, gris clair ou gris foncé pour les 3 céramiques étudiées (Alumine, Alumine Zircone, Alumine Télite)

Les revêtements présentent des duretés de surface bien plus élevées que celle du bois et de revêtements organiques commerciaux (peintures, lasures). Cette dureté est certainement à l'origine de la très bonne résistance aux termites observée pour tous les revêtements testés. En effet, aucun termite n'a pu traverser les revêtements en essai.

Le dépôt de métal et céramiques sur des panneaux de contreplaqué en épicéa a permis d'évaluer la réaction au feu des contreplaqués. Les dépôts testés (laiton, et Alumine Zircone sur laiton) ont montré une amélioration des performances énergétiques de réaction au feu, proche d'un Classement C, en comparaison avec le contreplaqué non revêtu (témoin) dont le classement est D.

Des essais de perméabilité à l'eau liquide ont révélé que les dépôts métalliques et céramiques sont très poreux et font peu barrière à l'eau. Le contact avec l'eau a généré une fissuration importante des revêtements. Il convient donc d'envisager ces dépôts dans des emplois sans contact avec l'eau. L'utilisation de ces dépôts sur bois dans des usages exposés aux intempéries

nécessite des investigations complémentaires. L'utilisation d'un bouche-pores pourrait peut-être résoudre le problème d'absorption d'eau.

Sur la base des premières éprouvettes fabriquées en laboratoire, l'IRCER a réalisé une première estimation du coût des traitements : le laiton est le revêtement le plus économique au mètre carré (76 €/m²) tandis que l'Alumine Zircon est le revêtement le plus cher (1217 €/m²). Optimiser l'épaisseur des dépôts est une option envisageable pour réduire les coûts des traitements.

Remerciements

Nous remercions le Conseil Régional de Nouvelle Aquitaine pour son soutien financier. Nous adressons nos remerciements aux différentes personnes ayant contribué à l'étude et notamment : Geoffroy Rivaud, David Ansard, Cécile Brunet, Dominique Mangin, Céline Reynaud, Wilfrid Pomarel, Sandra Warren.

Références

Nejad M. Shafaghi R., Pershin L., Mostaghimi J., Cooper P (2013) Copper coating on wood: a new way of protecting wood. Proceedings of the International Research group on Wood Protection, Document IRG/WP 13-30617, 7 pages, June 2013.

Podgorski L., Myalska H., Denoirjean A., Kutnik M (2020) Thermal spray to protect wood from termites. Proceedings of the International Research group on Wood Protection, Document IRG/WP 20-40905, IRG51 Webminar, 9 Pages, June 2020

Préservation de la biodiversité ligneuse locale : Evaluation des pratiques patrimoniales dans la gestion durable des forêts de Guadeloupe

FREULARD Justine¹, BEAUCHENE Jacques²

¹ ISTOM, Angers, France

² CIRAD, UMR EcoFoG, 971 Guadeloupe

j.freulard@istom.fr

Mots clés : Usages et connaissances de la biodiversité ligneuse, artisanat, patrimonialisation, forêt, bois d'œuvre, organisation territoriale, Guadeloupe

Contexte et objectifs

En Guadeloupe, les usages de la biodiversité ligneuse sont ancrés au sein du territoire depuis l'arrivée des premiers occupants méso-indiens environ 3000 avant JC. La population de l'île ainsi que ses paysages forestiers ont évolué au travers d'évènements historiques marquants et par les nombreux échanges régionaux et intercontinentaux de matériel végétal, maintenant néanmoins les usages de ces matériaux au centre de la culture guadeloupéenne. L'objectif de ce travail est d'étudier la résilience des usages patrimoniaux mobilisant la biodiversité ligneuse locale et leurs impacts sur la gestion durable des forêts de l'archipel. L'organisation territoriale est appréhendée par une enquête auprès d'une quarantaine d'acteurs impliqués dans l'approvisionnement en matières premières et la transformation de produits, et au sein des autorités régaliennes. Alors que le nombre d'artisans semble diminuer, ces activités artisanales ne disparaissent pas en raison de leur enracinement dans la culture créole. Elles se transforment pour s'adapter à l'évolution de la société guadeloupéenne, en adoptant notamment la mécanisation. Des néo-utilisateurs apparaissent, motivés par une reconversion professionnelle manuelle ou par une semi-industrialisation de l'activité. Par le contexte insulaire des forêts de Guadeloupe, leurs ressources sont précieuses et fragiles, rendant une exploitation industrielle inenvisageable. L'activité artisanale est toutefois limitée par la géomorphologie de l'île et les contraintes matérielles. Bien que le nombre d'artisans soit restreint, les guadeloupéens entretiennent un lien étroit avec la biodiversité de l'île en raison de la forte ruralité de la population et de l'importance que vouent certains cultes aux essences forestières. La forêt arbore ainsi une valeur emblématique, en partie maintenue par l'activité artisanale qui véhicule et transmet des connaissances sur ces écosystèmes.

La gestion forestière reste néanmoins inégale sur le territoire à cause de l'indivision des forêts privées et de l'inexistence d'une gestion commune au sein de ces dernières. Cependant, les forêts privées sont aujourd'hui les principales sources d'approvisionnement en ressources forestières. De nombreuses mesures sont envisagées afin de structurer cette filière artisanale dynamique majoritairement informelle et désorganisée. Elles s'appuient notamment sur une meilleure connaissance des réglementations en vigueur aux échelles locale, nationale et internationale, et la mise en place de formations sur les métiers du bois.

Nous proposons d'inscrire ce travail au sein du GDR Science du Bois, où nous traiterons de la problématique suivante « Existe-t-il encore des usages patrimoniaux valorisant la biodiversité ligneuse locale qui contribuent à la gestion durable des forêts Guadeloupéennes ? ». Au regard du contexte, de la bibliographie et du travail d'enquêtes, les hypothèses sont les suivantes ; i) Les artisans exerçant ces métiers sont attachés aux produits du bois et aux essences (arbres et lianes) et entretiennent des connaissances locales sur leur forêt. ii) Le savoir-faire est conservé

par la transmission des connaissances entre les artisans en activité et risque de se perdre si cette activité périclité, iii) Les artisans se préoccupent de la gestion de la forêt pour leurs approvisionnements mais aussi pour le bien-être qu'elle procure aux habitants de l'île, ce qui pourrait être compatible avec les modes de gestion des forêts publiques et privées en cours de réactualisation.

Matériel et méthodes

Cette étude fut réalisée via une approche ethnoécologique, et a été possible grâce à la participation volontaire de 41 personnes en lien avec la filière bois-forêt de Guadeloupe. Des entretiens semi-directifs ainsi que des parcours commentés en forêt, ont été réalisés à la suite d'une étude bibliographique et du patrimoine culturel immatériel (Pastor-Gimeno et al., 2020) et ont permis d'appréhender le contexte guadeloupéen. Ainsi, des artisans du bois, des vanniers, des exploitants forestiers, des agriculteurs et différentes institutions ont été enquêtés afin de comprendre d'avantage l'ampleur de l'usage des matériaux ligneux dont le bois d'œuvre, ainsi que les imbrications sociales, culturelles et écologiques que cela implique (Tab. 1).

Tab. 1 : Echantillonnage des entretiens semi-directifs

| Activités | Agriculteurs | Exploitants forestiers | Artisans | Institutions publiques | Sociétés privées, Associations |
|---|--------------|------------------------|----------|------------------------|--------------------------------|
| <i>Travail du bois brut (scieur, tronçonneur, producteur de bois)</i> | 2 | 7 | | 1 | |
| <i>Fabrication d'objets tressés (vannerie)</i> | | | 7 | | |
| <i>Fabrication de roues, charrettes (charron)</i> | | | 2 | | |
| <i>Fabricant d'instrument de musique en bois (ka)</i> | | | 3 | | |
| <i>Fabrication d'objets en bois sculpté (tourneur sur bois, calebassier)</i> | | | 3 | | |
| <i>Fabrication de meubles et d'aménagements intérieurs (menuisier, ébéniste)</i> | | | 5 | 1 | 1 |
| <i>Construction de structures en bois (charpentier, charpentier maritime, tailleur d'essente)</i> | | | 6 | | |
| <i>Gestion forestière</i> | | | | 2 | |
| <i>Centre de formation</i> | | | | | 1 |

Une analyse a été réalisée avec le logiciel R studio (package SBM bipartite) afin de mettre en exergue les essences utilisées de nos jours et dans le passé selon les activités étudiées. Le package propose un support pour les outils d'estimation et de manipulation des variables selon le Modèle à Blocs Stochastiques (SBM) développé par Chiquet et al. (2023). Les essences citées dans cette étude ont été identifiées à l'aide d'une triangulation de l'information. Le nom vernaculaire fourni par l'enquêté est étudié en fonction de son usage relatif dans la bibliographie (Fournet 2002, Rollet et al. 2010). Une analyse des caractéristiques morphologiques ou

géographiques fournies par l'enquête ou déduites au vu de son approvisionnement sert d'indicateur supplémentaire.

Résultats et discussion

La forêt et les ressources dont elle regorge sont importantes dans l'histoire guadeloupéenne, marquée par l'ensemble des échanges intercontinentaux et des cultures qui la composent. Sa topographie variée, son climat tropical et sa richesse en écosystèmes font de la Guadeloupe un hotspot de la biodiversité mondiale. Son insularité accroît cependant la pression sur la fragile ressource. Au cœur des préoccupations en cette ère anthropocène responsable du dérèglement climatique, la gestion et les usages de la forêt occupent une position centrale et cruciale.

La population guadeloupéenne est principalement rurale et entretient depuis toujours des liens étroits avec la forêt, des connaissances se transmettent inconsciemment par les pratiques quotidiennes, les expressions et la langue créole, les contes et la spiritualité. L'analyse de l'organisation territoriale est illustrée en partie sur la Fig. 1 présentant l'utilisation de la ressource par les acteurs enquêtés. Il est néanmoins nécessaire de comprendre que 60% des artisans enquêtés se fournissent également chez des importateurs afin de subvenir à leurs besoins. Cette importation est toutefois nécessaire pour répondre aux besoins actuels en bois de l'île, qui ne peut être satisfaite uniquement avec les essences aujourd'hui présentes dans ses forêts.

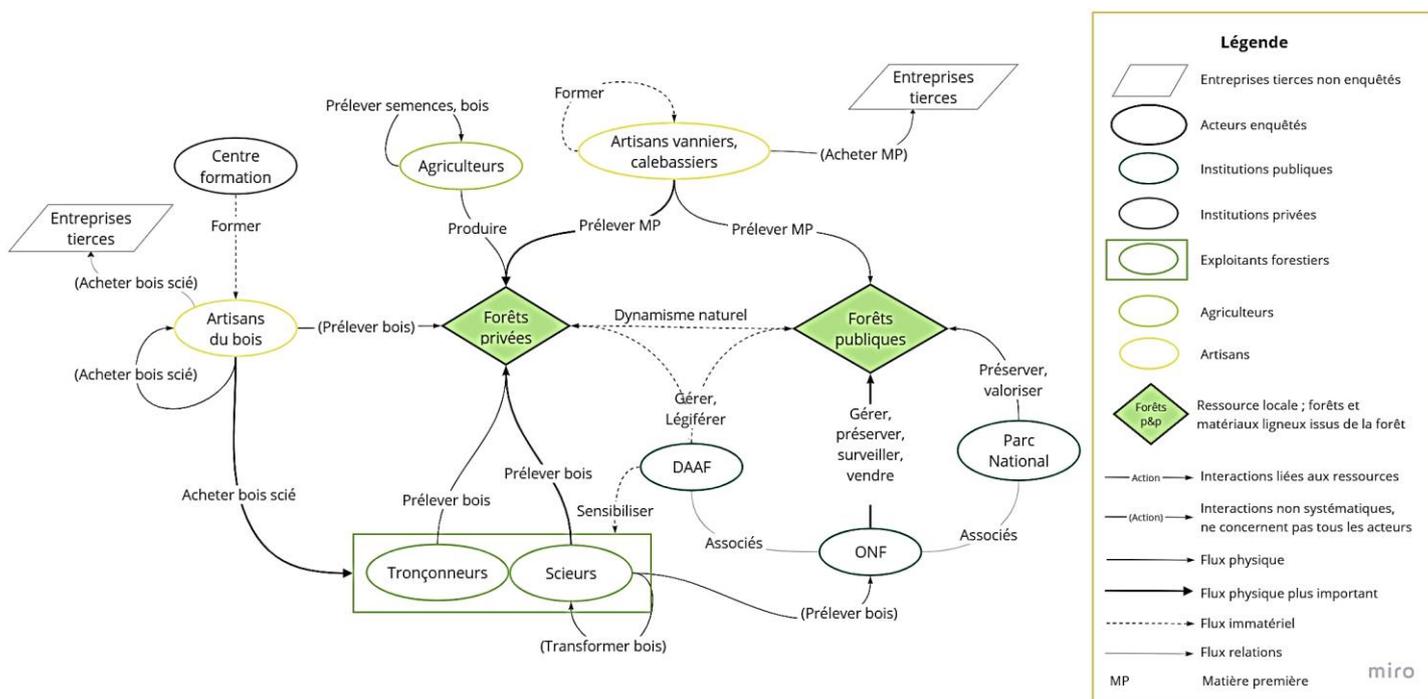


Fig. 1 : Schéma de l'utilisation de la ressource par les acteurs enquêtés

Les principales essences utilisées identifiées lors de l'étude ont été analysées par le package sbm bipartite sur R. Ce sont l'acajou rouge (*Cedrela odorata*), le poirier (*Tabebuia heterophylla*) et le mahogany grande feuille (*Swietenia macrophylla*), puis le mahogany petite feuille (*Swietenia mahagoni*) et l'acajou blanc (*Simarouba amara*) qui sont les plus cités, et plus particulièrement par le groupe formé par les scieurs, les ébénistes-menuisiers et les constructeurs d'instruments de musique et de saintoises (Fig. 2).

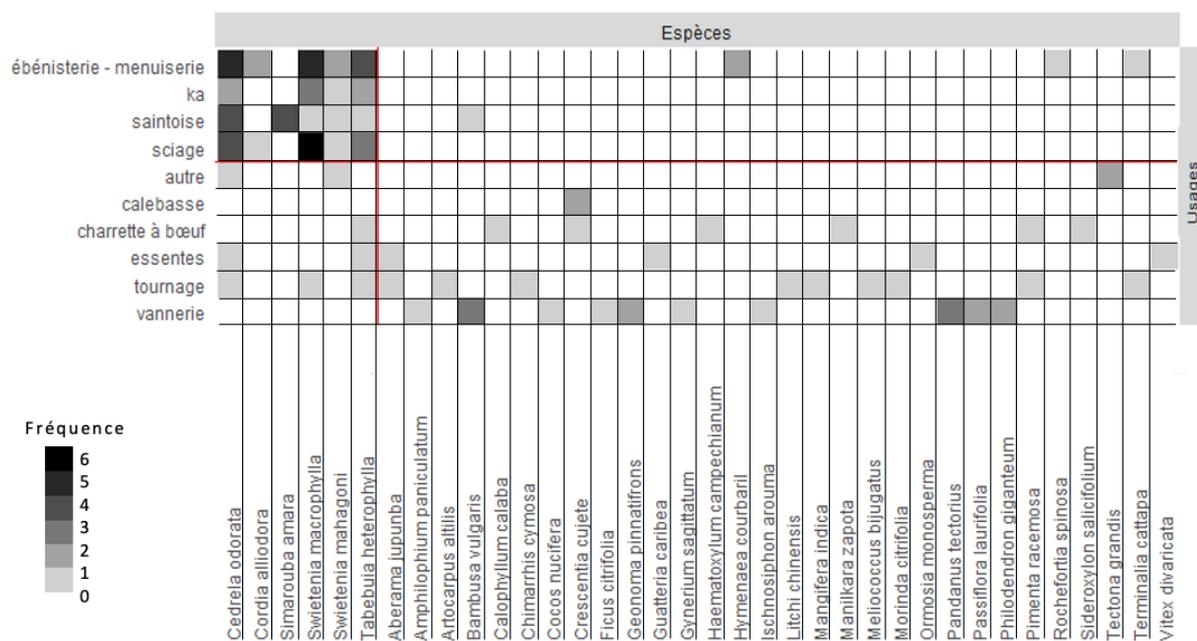


Fig. 2 : Répartition des essences les plus utilisées selon les principaux usages (R studio, sbm bipartite Chiquet, Donnet, Barbillon, n=106 citations)

La durabilité est une propriété importante dans la sélection d'essences d'arbres dans la fabrication et surtout dans la construction, en raison de l'immobilisation des structures en bois et de leurs différentes contraintes possibles tels que les pièges à eau (Vernay et Mouras 2009). Elle définit la capacité naturelle du bois à résister aux attaques de champignons lignivores lorsque l'humidité du bois est élevée, et dépend des composés chimiques secondaires produits lors de la duraminisation (Cailliez et al. 2002). Parmi les artisans enquêtés, peu nombreux sont ceux dont le travail est dédié à la construction de structures en bois (Tab. 2), nous retrouvons beaucoup de pièces mobiles ou stockées en intérieur. La durabilité n'est ainsi pas obligatoirement le premier critère choisi, la légèreté l'est davantage.

Tab. 2 : Densité du bois moyenne et indication de durabilité naturelle des 10 espèces locales les plus utilisées par les enquêtés

| Espèce/Densité à 12% | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | Durabilité Champignon | Durabilité Terme |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|------------------|
| <i>Cedrela odorata</i> | | | 0.45 | | | | | | | | | | | | | D | M |
| <i>Cordia alliodora</i> | | | | 0.51 | | | | | | | | | | | | D | M |
| <i>Hymenaea courbaril</i> | | | | | | | | | | 0.85 | | | | | | D | M |
| <i>Litchi chinensis</i> | | | | | | | | | | | | | 0.98 | | | D | M |
| <i>Pimenta racemosa</i> | | | | | | | | | | | | | 0.97 | | | D | M |
| <i>Simarouba amara</i> | | 0.40 | | | | | | | | | | | | | | | S |
| <i>Swietenia macrophylla</i> | | | | 0.54 | | | | | | | | | | | | D | M |
| <i>Swietenia mahagoni</i> | | | | | | | 0.65 | | | | | | | | | D | M |
| <i>Tabebuia heterophylla</i> | | | | | 0.58 | | | | | | | | | | | | S |
| <i>Terminalia catappa</i> | | | | | 0.55 | | | | | | | | | | | | S |

D = durable, M = moyennement durable, S = sensible (Rollet et al 2010, Gérard et al 2016)

Conclusion

Les artisans, exploitants forestiers et agriculteurs démontrent un attachement aux produits du bois et de la forêt, illustrant ainsi une connaissance précieuse de la forêt guadeloupéenne. Cette expertise repose non seulement sur l'expérience personnelle et empirique, mais aussi sur la transmission intergénérationnelle des savoir-faire et usages. Bien que les artisans semblent vieillir, entraînant une perte à terme des connaissances et savoir-faire, ce métier qui était alors

une vocation tend à devenir une reconversion professionnelle. L'apprentissage s'adapte avec l'apparition de quelques formations professionnalisantes qui attirent de nouveaux utilisateurs, ainsi que l'arrivée d'étrangers s'installant pour travailler les essences locales. Les artisans déjà en activité démontrent une forte volonté de transmettre leurs connaissances dans des cadres appropriés. L'activité artisanale n'est pas près de disparaître, mais est amenée à évoluer.

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement Jacques Beauchêne, chercheur écologue à l'UMR Ecofog pour m'avoir chaleureusement accueillie au sein de l'unité de recherche, et auprès de qui j'ai découvert une partie de la biodiversité de l'île et de ses voisines Dominique et Sainte Lucie. Merci de m'avoir initiée à l'écologie, merci pour tes nombreuses relectures et tes conseils avisés. Au plaisir de retravailler avec toi, en Guadeloupe ou ailleurs.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont accordé leur temps et sans qui cette étude n'aurait pas pu voir le jour, artisans, passionnés, retraités, qui m'ont partagé leurs savoir-faire ainsi qu'une partie de leur culture, pour ça, je vous en suis reconnaissante. Mais aussi chercheurs et collègues qui m'ont appuyé sur des points techniques du traitement de mes données. Je pense notamment à Sophie Donnet pour m'avoir aiguillé sur R et l'application du modèle statistique bipartite.

Je tiens à remercier tout particulièrement Kessen Poitou et Cyril Hostache qui m'ont lancé dans l'étude en me partageant leur réseau avec un regard bienveillant, Jonathan Laurienty pour son initiation à l'art de la vannerie et M. Serin Rambo qui m'a emmenée plusieurs fois sur des chantiers de coupe de bois et m'a fait découvrir son métier de tronçonneur et son univers.

Je voudrais également remercier l'équipe enseignante qui m'a encadrée en amont et durant le stage, tout particulièrement ma tutrice Claire Durand ainsi que Michel Vaillant pour leur soutien et leur appui. Ma tutrice m'a apporté un regard extérieur utile et apprécié, encourageant l'interdisciplinarité de l'étude.

Références

Association Gaiac (2006) Des métiers du bois en Guadeloupe qui disparaissent. Editions Antillaises de Presse. France : 161 p.

Barrau J., Montbrun C. (1978) La mangrove et l'insertion humaine dans les écosystèmes insulaires des Petites Antilles: Le cas de la Martinique et de la Guadeloupe. *Social Science Information*, 17 (6) : 897-919. doi: 10.1177/053901847801700606. [consulté le 21 mars 2023] url: <https://doi.org/10.1177/053901847801700606>.

Cailliez F., Gril J., Thibaut B. (2002) Le bois, écomatériau par excellence. *Le bois* : 6p.

Chiquet J., Donnet S., Barbillon P. (2023) Simple and Bipartite Stochastic Block Models [consulté le 13 septembre 2023]. https://grosssbm.github.io/sbm/articles/SBM_fungus_tree_network.html

DAAF (2020) Programme régional de la forêt et du bois de Guadeloupe. 101 p.

Dodier R. (2018) Perception sociale de la forêt : un espace plus prophylactique que pathogène. *Revue Forestière Française*, (2-3-4) : 287. doi: 10.4267/2042/70002. [consulté le 18 avril 2023] url: <https://revueforestierefrancaise.agroparistech.fr/article/view/5137>.

Fournet J. (2002) Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. Tome 1 et 2. Gondwana Editions. Montpellier : Cirad-Ed, 1331p.

Gérard J. (ed), Guibal D., Paradis S., Cerre J.-C., Châlon I., Thévenon M.-F., Thibaut A., Brancheriau L., Gandon G., Guyot A., Langbour P., Lotte S., Marchal R., Martin P., Thibaut B., Vernay M., Amusant N., Baudassé C., Boutahar N., Cabantous B., Gérard C., Méjean C., Mouras S., Troalen N., Vialle M., Volle G., Zaremski A., Baillères H., Beauchêne J., Boyer F., Calchera G., Candelier K., Daigremont C., Fouquet D., Gallet P., Koese S., Leménager N., Martin L., Napoli A., Pignolet L., Pinta F., Roda J.-M., Sales C., Valière P. (2016) Atlas des bois tropicaux. Ed. Quae.

Joseph P. (2009) La végétation forestière des Petites Antilles - synthèse biogéographiques et écologique, bilan et perspectives. Karthala. Paris : Karthala, 490 p.

Pastor-Gimeno J.D., Ortiz-Ávila D., Tortoriello S. (2020) État des lieux de la valorisation et de la connaissance du patrimoine culturel immatériel de Guadeloupe. Direction des Affaires Culturelles de Guadeloupe; Région de Guadeloupe; Association île du Monde, 623.

Ramade F., Joseph P. (2009) Impact de l'homme moderne sur les forêts tropicales _ Ses conséquences prévisibles sur la biodiversité planétaire et dans la perspective d'un développement durable. In: Écosystèmes forestiers des Caraïbes, Google-Books-ID: lpD_NoM0k_0C. Paris, France : Karthala Editions : p. 17

Rollet B., Bernard J.-F., David J., Detienne P., Fiard J.-P., Mouton J., Rousteau A. (2010) Introduction à la dendrologie. Office National des Forêts, 276 p. (Coll. Arbres des Petites Antilles).

Terral R., Sélise M. (2018) Dynamiques urbaines communes et spécificités des villes des Antilles françaises (Guadeloupe, Martinique) des origines de la colonisation (1635) à nos jours. Études caribéennes, (39-40) : doi: 10.4000/etudescaribeennes.12811. [consulté le 11 août 2023] url: <https://journals.openedition.org/etudescaribeennes/12811>.

Terver P. (1947) Le commerce des bois tropicaux. 2. L'embarquement des bois. Bois et forêts des tropiques, 1 : 61-72. doi: 10.19182/bft1947.1.a18307. [consulté le 14 août 2023] url: <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/18307>.

Vernay M., Mouras S. (2009) Utilisation des bois de Guyane dans la construction. Versailles : Ed. Quae, 159 p. (Guide pratique : Quae) ISBN 978-2-7592-0358-1

Vers la mise en place d'abaque d'équilibre hygroscopique des essences des feuillus tropicaux

ASSEKO ELLA Martian¹, MOUTOU PITTI Rostand^{1,2}, GIACOMO Goli³, GRIL Joseph^{1,4}

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000
Clermont-Ferrand, France

²CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon

³University of Florence, DAGRI-Department of Agriculture, Food, Environment and
Forestry, 50145 Firenze, Italia

⁴Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000 Clermont Ferrand, France

Mots clés : Abaques ; Equilibre hygroscopique ; Isotherme de sorption ; Feuillus tropicaux

Contexte et problématique

Les matériaux hygroscopiques comme le bois ont un état hydrique fortement influencé par l'environnement (humidité et température) dans lequel ils évoluent. Il est connu par ailleurs que leurs propriétés mécaniques peuvent fortement varier avec ces conditions climatiques. Leur utilisation en structure nécessite donc une meilleure estimation de l'état hydrique pour une bonne mise en œuvre. C'est dans ce sens que des normes de calculs pour la construction telles que l'Eurocode 5 se sont basées sur des outils tels que des abaques d'équilibres hygroscopiques. Cependant il n'en n'existe qu'un seul abaque à ce jour, conçu pour répondre à une problématique de séchage de bois résineux (Keylwerth et Noack 1964). De ce fait son usage pour les feuillus n'est pas forcément approprié. L'intérêt grandissant pour les feuillus, notamment tropicaux, conduit inévitablement à la réactualisation de l'Eurocode 5 en proposant des études similaires à celles effectuées sur les résineux. C'est ainsi que dans le projet ANR EFEUR5 des abaques d'équilibre hygroscopique ont été proposées pour les feuillus tempérés (Varnier 2019). Une généralisation plus complète des règlements associés à l'Eurocode 5 passe inévitablement par une intégration des feuillus tropicaux en effectuant des études similaires à celles des résineux et feuillus tempérés. L'objectif de ce papier est de présenter une approche qui pourrait être adoptée pour établir des abaques d'équilibre hygroscopique des feuillus tropicaux.

Méthodologie envisagée

Isotherme de sorption et paramètres du modèle de Merakeb

Dans le cadre de ce projet deux possibilités sont envisageables : (i) la première consisterait à partir de la base de données des essences tropicales du CIRAD, en collaboration avec l'UR BioWooEB ; (ii) la deuxième à mesurer des points de l'isotherme de sorption. En se basant sur cet isotherme, on peut considérer le modèle semi empirique de Merakeb (2006) assimilant la pression de vapeur saturante à un potentiel chimique d'une espèce en équilibre dont l'expression dépend de la pression de vapeur. En se basant sur l'équation de Clapeyron, il a proposé une relation reliant la teneur en eau W et l'humidité relative (HR) sous la forme $\ln(W/W_s) = \phi \ln(HR) \cdot \exp(\alpha HR)$ où ϕ représente un paramètre thermodynamique, α une constante de calage dont les valeurs sont différenciées selon le cycle de sorption, W_s la teneur en eau de saturation à 100% d'humidité relative. La Fig. 1 présente les mesures des points des isothermes en adsorption issues de notre base de données (Asseko 2022) pour deux essences tropicales avec les 3 paramètres du modèle de Merakeb (2006) que nous avons déterminés.

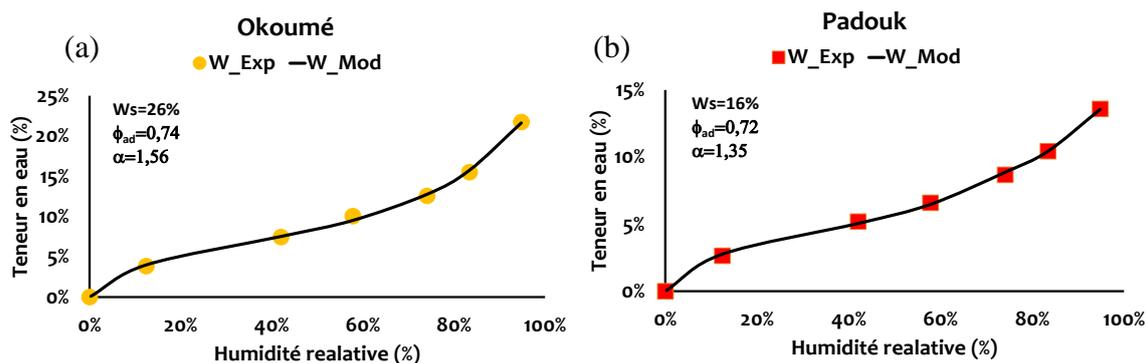


Fig.1 : Isotherme de sorption pour une phase d'humidification (ϕ_{ad} paramètre en adsorption) :
(a) Okoumé ; (b) Padouk.

Proposition d'abaques d'équilibres hygroscopiques

Il est admis aujourd'hui que l'équilibre hygroscopique est conditionné par la température du milieu. Ainsi Perré et May (2001) et Merakeb (2006) ont proposé une première correction touchant particulièrement le taux d'humidité d'équilibre W_s à 100% d'humidité relative, ou point de saturation des fibres (PSF). De même les travaux de Frandsen (2007), basés sur une approche des échanges thermodynamiques avec la température comme catalyseur selon le principe de Le Chatelier, ont permis de donner une forme analytique du PSF en fonction de la température :

$$w_s(T) = \left(w_s^0 + \frac{C_a}{C_e} \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_e}{L} \cdot T\right) - \frac{C_a}{C_e}$$

Dans cette expression la température T est exprimée en °C, w_s^0 désigne le PSF à 0°C, C_a et C_e représentent respectivement les capacités thermiques massiques du matériau anhydre et de l'eau, L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau libre. A partir de là, nous pouvons déterminer la relation $W_s(T)$ pour chacune des essences souhaitées. Cela permet de déterminer les isothermes de sorption de chaque essence pour chaque température. En regroupant l'influence de la température sur la teneur en eau de saturation, il est possible de proposer des abaques d'équilibre pour chaque essence.

Références

- Asseko Ella, M. (2022). Effet de la mécanosorption et de l'hygroviscoélasticité sur la fissuration des feuillus gabonais et résineux européens. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne.
- Frandsen H.L. (2007) Selected constitutive models for simulating the hygromechanical response of wood. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Keylwerth R., Noack D. (1964) Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft, Reinbek Institut für Holzphysik und mechanische Holztechnologie. Holz als Roh-und Werkstoff 22, 29–36. <https://doi.org/10.1007/BF02627726>
- Merakeb S. (2006) Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois. Ph.D. thesis, Université de Limoges
- Perré P., May B.K. (2001) A Numerical drying model that accounts for the coupling between transfers and solid mechanics. Case of highly deformable products. Dry. Technol. 19, 1629–1643.
- Varnier M. (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie. Ph.D. thesis, Université de Limoges.

Effets synergiques et historiques des liquides hydroalcooliques sur le gonflement du chêne.

DUSSAUT Cédric^{1,2}, COLIN Julien¹, CASALINHNO Joel¹, TEISSIER DU CROIS Rémi², LITOUX-DESRUES François², ABADIE Charlotte³, PERRÉ Patrick^{1,4}

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, 8-10 rue Joliot-Curie 91190, Gif-sur-Yvette,

²Chêne&Cie, R&D, 76 Quai de Paludate, 33800, Bordeaux, France

³Non affiliée

⁴Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), 3 rue des Rouges Terres 51110 Pomacle, France

cedric.dussaut@centralesupelec.fr

Mots clefs : tonnellerie, corrélation d'images, extractibles, irréversibilité, sorption

Contexte et objectifs

Le vieillissement est une étape clé du procédé de production des vins et spiritueux. Elle fait intervenir de nombreux échanges massiques et thermiques entre le liquide et le chai. La barrique en chêne constitue un milieu poreux complexe qui sert à la fois de contenant et d'interface d'échange. Lors du vieillissement, la partie interne de la barrique est imprégnée par le liquide qui migre vers l'extérieur. Au-delà du front d'imprégnation, un gradient de concentration de vapeur crée un flux diffusif vers le chai (del Alamo-Sanza et Nevares 2018). Ces phénomènes sont responsables d'une perte volumique connue sous le nom de part des anges, représentant entre 1% et 3% du volume de la barrique par an, en fonction des conditions environnementales (Mosedale et Puech 1998). De plus, le bois n'est pas inerte et la présence d'eau et d'éthanol peut modifier sa structure et ses propriétés physiques.

L'hygroscopicité du bois est liée à la capacité de sorption de l'eau dans la paroi cellulaire, par liaisons hydrogènes. De même, l'éthanol peut se lier à la paroi. Cette sorption entraîne un gonflement du bois en raison de sa structure sub-pariétale. Dans le cas d'une barrique, compte tenu de l'assemblage contraint mécaniquement, ce gonflement permet d'améliorer l'étanchéité entre les douelles.

Aujourd'hui, les effets couplés de l'eau, de l'éthanol et du temps sur la paroi cellulaire ne sont pas pleinement connus. Plusieurs travaux ont montré que le gonflement du bois dans l'éthanol était moins important que dans l'eau (Mantanis et al 1994). En ce qui concerne les solutions binaires, certaines études ont mis en lumière un hypergonflement, suggérant une synergie entre l'eau et l'éthanol (Meier et al 2005, Bossu et al 2018). Notre étude s'est concentrée sur les équilibres et les dynamiques de gonflement du chêne immergé dans des liquides purs et binaires. Trois résultats sont présentés : i) Influence de la concentration en éthanol du liquide sur le gonflement macroscopique du bois ; ii) Effet de l'historique des compositions de liquides successivement de mis en contact avec le bois de chêne et iii) Changement dimensionnel de l'état anhydre en fonction de la concentration d'éthanol lors de la phase d'immersion.

Matériel et méthodes

Un dispositif expérimental original, constitué d'un banc optique et d'un support-échantillon, permet le suivi par corrélation d'images du gonflement de plusieurs échantillons de chêne,

immergés simultanément, dans les directions radiale et tangentielle. Pour la première étude – gonflement en fonction de la composition du liquide –, les liquides purs ainsi que six concentrations intermédiaires en éthanol ont été utilisés (de 10% vol à 96% vol). Pour la troisième étude – déformation de l'état anhydre –, ces mêmes échantillons de bois ont été séchés à l'air sec puis de nouveau pris en photo. Enfin, pour la deuxième étude – historique des compositions de liquides mis en contact –, deux échantillons ont été soumis à des scénarios d'immersion différents, respectivement eau, puis éthanol, puis eau et éthanol, puis eau, puis éthanol.

Résultats et discussions

Influence de la concentration en éthanol du liquide sur le gonflement macroscopique du bois

Les résultats (Fig. 1) montrent une synergie entre eau et éthanol, se traduisant par un hypergonflement tangentiel supérieur (jusqu'à 11%) quand les deux espèces sont en quantités suffisantes, c'est-à-dire sur la plage de concentration d'éthanol allant de 40% vol à 70% vol.

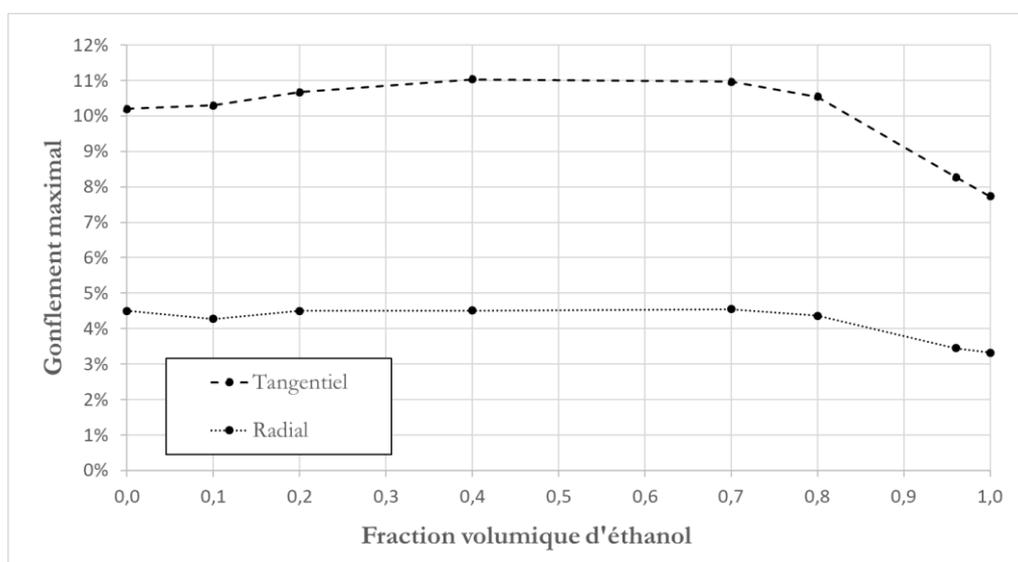


Fig. 1 : Gonflement maximal d'échantillons de chêne immergés dans différentes concentrations d'éthanol

Effet de l'historique des compositions des liquides mis en contact avec le bois de chêne

Les résultats des études séquentielles (Fig. 2) indiquent que l'historique de mise en contact a une influence sur le gonflement macroscopique. En particulier, les valeurs d'hypergonflement observées pour mélanges binaires (40%vol à 70%vol d'éthanol) dans la première étude ont été retrouvées uniquement dans le cas où un échantillon a été immergé dans l'eau après avoir été immergé dans l'éthanol (échantillon A après 1000 heures et échantillon B entre la 500^{ème} et la 1000^{ème} heure). De plus, pour le changement inverse, à savoir eau vers éthanol, une baisse du gonflement a été observée pour les deux échantillons mais les dimensions restent supérieures à celles mesurées lors d'une première immersion dans l'éthanol.

Changement dimensionnel de l'état anhydre en fonction de la concentration d'éthanol lors de la phase d'immersion

Pour l'ensemble des échantillons, nous observons (Fig. 3) une réduction dimensionnelle de l'état anhydre après immersion dans le liquide par rapport à l'état anhydre initial, suggérant une irréversibilité de l'effet des liquides. Dans une certaine mesure, la courbe obtenue présente la même forme que la courbe relative à la première étude, indice ici encore d'une synergie des deux espèces présentes dans la phase liquide.

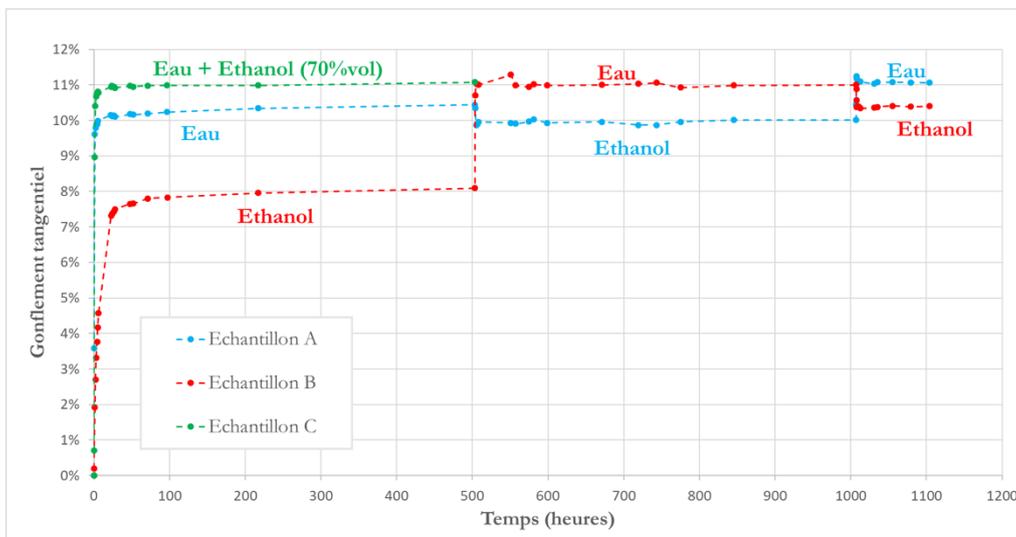


Fig. 2 : Gonflement tangentiel d'échantillons de chêne soumis à différentes séquences d'immersion

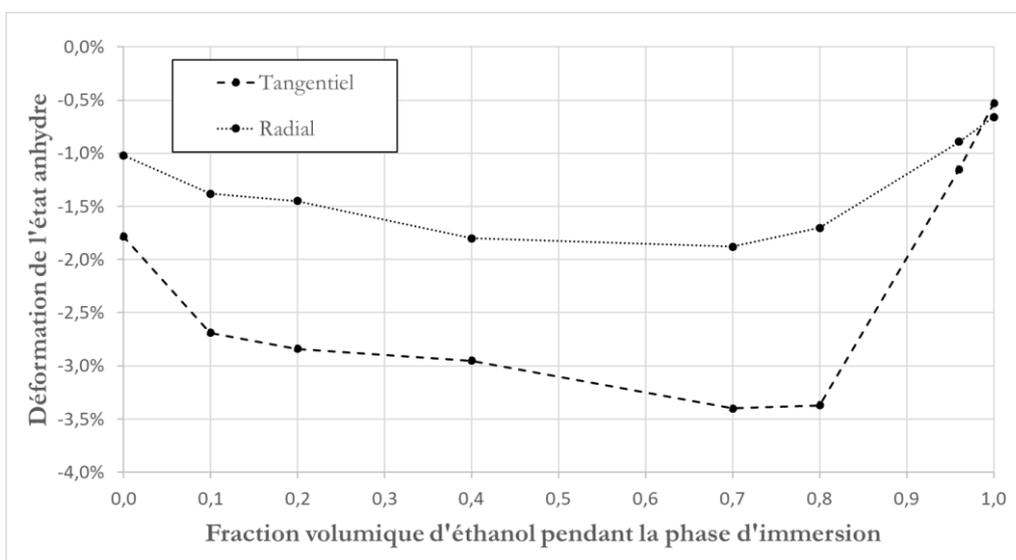


Fig. 1 : Changement dimensionnel de l'état anhydre d'échantillons de chêne après immersion dans différentes concentrations d'éthanol

Discussion

Les résultats présentés indiquent que les effets couplés de l'eau et de l'éthanol sur le bois sont plus complexes que la simple additivité. À l'équilibre (Fig. 2), les valeurs de gonflements synergiques en présence des deux espèces (eau et éthanol) suggèrent que ces derniers présentent des affinités pour des sites de sorption communs mais aussi pour des sites qui leur sont propres. Il est notamment connu que l'eau s'adsorbe particulièrement sur les hémicelluloses et la cellulose amorphe. L'éthanol aurait, quant à lui, une affinité plus faible pour ces sites de sorption mais serait capable d'interagir avec la lignine. Une des hypothèses fait intervenir le poids et l'encombrement moléculaires des espèces, soutenant que l'eau est plus apte que l'éthanol à s'insérer entre les polysaccharides pour atteindre les sites de sorption. De plus, l'éthanol peut générer d'autres types d'interactions avec la paroi cellulaire, en altérant la lignine, en particulier au niveau de la lamelle moyenne et du point triple, et ainsi rendre la structure du bois plus flexible.

Ces hypothèses sont confirmées par les résultats de l'étude séquentielle (Fig. 2). En observant la courbe bleue, le remplacement de l'eau par l'éthanol dans le milieu liquide mène à un nouvel

équilibre. Ce gonflement se trouve être inférieur à celui observé lors d'une première immersion dans l'eau pure – désorption des molécules d'eau due à une faible activité de l'eau dans le liquide et effet de l'éthanol sur la lignine –, et supérieur à celui observé lors d'une première immersion dans l'éthanol pur –meilleure pénétration de l'éthanol dû à un écartement préalable des macromolécules par l'eau –. Quant à l'échantillon ayant connu le scénario inverse, le remplacement de l'éthanol par l'eau a permis une accumulation des effets des deux espèces – effet irréversible de l'éthanol sur la lignine et fort gonflement à l'eau –, résultant en un hypergonflement du même ordre de grandeur que celui observé pour des solutions hydroalcooliques.

Enfin les résultats après séchage (Fig. 3) mettent en lumière l'effet cumulatif des actions irréversibles de l'eau et de l'éthanol : extraction de composés à faible poids moléculaire (notamment par l'eau) et dégradation de la lamelle moyenne par l'éthanol.

Conclusion et perspectives

Ce travail s'inscrit dans une volonté de compréhension des interactions spécifiques et couplées de l'eau et de l'éthanol avec le bois de chêne. Plusieurs phénomènes ont pu être mis en évidence selon la composition des liquides purs ou binaires : adsorption, extraction et dégradation. D'une espèce à l'autre, ces phénomènes semblent différer par leur ampleur et leur réversibilité. Ainsi, les actions simultanées ou séquentielles de l'eau et de l'éthanol sur la matrice lignocellulosique mènent à des effets synergiques et non simplement additifs. Pour compléter l'étude et la discussion des résultats, des essais de DVS (Dynamic Vapour Sorption) en eau et éthanol pourront être menés pour mettre en évidence l'effet de l'état physique de l'eau et d'éthanol mis en contact avec le bois sur les phénomènes observés.

Références

- Bossu J, Le Moigne N., Corn S., Trens P., Di Renzo F. (2018) Sorption of water-ethanol mixtures by poplar wood: swelling and viscoelastic behaviour. *Wood Science and Technology*, 52(4).
- del Alamo-Sanza M., Nevares I. (2018) Oak wine barrel as an active vessel: A critical review of past and current knowledge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(16), 2711-2726.
- Mantanis G., Young R., Rowell R. (1994) Swelling of Wood Part II. Swelling in Organic Liquids. *Holzforschung* 48:480-490.
- Meier P., Kaps T., Kallavus U. (2005) Swelling of Pinewood (*Pinus Sylvestris*) in Binary Aqueous Solutions of Organic Substances. *Materials Science* 11(2):140-145.
- Mosedale J.R., Puech J.L. (1998) Wood maturation of distilled beverage. *Trends in Food Science & Technology* 9: 95-101.

Liste des participants

| NOM Prénom | Labo/organisme (pays) | email |
|---------------------|---|--|
| Raoufeh ABEDINI | U.Sari, Sari (IR) | abedini_rf@yahoo.com |
| Jerome AFOUTOU | GC2D, Egletons | jerome.afoutou@unilim.fr |
| Kyle AGUILAR | Lermab, Nancy | kyle.aguilar@univ-lorraine.fr |
| Alaa AL FAYE | UM-msb, Montpellier | alaa.al-fay@umontpellier.fr |
| Tancrede ALMÉRAS | LMGC, Montpellier | tancrede.almeras@umontpellier.fr |
| Nicolas ANGELLIER | GC2D, Egletons | nicolas.angellier@unilim.fr |
| Maelle ARNAUD | UM-msb, Montpellier | maelle.arnaud01@etu.umontpellier.fr |
| Olivier ARNOULD | LMGC, Montpellier | olivier.arnould@umontpellier.fr |
| Martian ASSEKO ELLA | I. Pascal, Clermont-Fd | martian.asseko-ella@univ-ubs.fr |
| Aurelie AUTISSIER | LMGC, Montpellier | aurelie.autissier@umontpellier.fr |
| Eric BADEL | PIAF, Clermont-Fd | eric.badel@inrae.fr |
| Sandrine BARDET | LMGC, Montpellier | sandrine.bardet@umontpellier.fr |
| Nassim BELMOKHTAR | BioForA, Orléans | nassim.belmokhtar@inrae.fr |
| Gael BERTRAND | UM-msb, Montpellier | gael.bertrand@etu.umontpellier.fr |
| Arnaud BESSERER | Lermab, Epinal | arnaud.besserer@univ-lorraine.fr |
| Philippe BLANCHARD | LIMBHA, Nantes | philippe.blanchard@esb-campus.fr |
| Laurent BLÉRON | Lermab, Epinal | laurent.bleron@univ-lorraine.fr |
| François BLONDEL | Artehis, Dijon | f.blondel.25@gmail.com |
| Gaspard BLONDET | Enpc, Champs-s-M | gaspard.blondet@enpc.fr |
| Hugo BLYTH | UM-msb, Montpellier | hugo.blyth1@gmail.com |
| Robin BOIRON | UM-msb, Montpellier | robin.boiron@gmail.com |
| Juliette BOIVIN | Labomap, Cluny | juliette.boivin@ensam.eu |
| George BOLES | I2M, Bordeaux | george.boles@u-bordeaux.fr |
| Arthur BONTEMPS | ECAM, Lyon | arthur.bontemps@ecam.fr |
| Romain BOUDAREL | UM-msb, Montpellier | romain.boudarel@etu.umontpellier.fr |
| Clément BOUDAUD | LIMBHA, Nantes | clement.boudaud@esb-campus.fr |
| Sandrine BOUQUILLON | ICMR, Reims | sandrine.bouquillon@univ-reims.fr |
| Thomas BOURSAT | LMGC, Montpellier | tboursat.pro@gmail.com |
| Ludwig BOUSSAROQUE | UM-msb, Montpellier | ludwig.boussaroque@etu.umontpellier.fr |
| Loïc BRANCHERIAU | Biowoeb, Montpellier | loic.brancheriau@cirad.fr |
| Laure BREMAUD | Labcis, Limoges | laure.bremaud@unilim.fr |
| Christian BRETON | BioForA, Orléans | christian.breton@inrae.fr |
| Joseph BRIHIEZ | MNHM, Paris | jbrihiez@gmail.com |
| Geraldine BRUN | Institution för Kulturvård, Mariestad (SE) | geraldine.brun@gu.se |
| Chloe CAILLEAUD | UM-msb, Montpellier | chloe.cailleaud@etu.umontpellier.fr |
| Mathilde CAILLER | UM-msb, Montpellier | mathilde.cailler31@gmail.com |
| Thomas CATTEROU | FCBA, Bordeaux | thomas.catterou@fcba.fr |
| Gilles CHAIX | Agap, Brésil/Piracicaba | gilles.chaix@cirad.fr |
| Matisse CHAMBRY | UM-msb, Montpellier | matisse.chambry@etu.umontpellier.fr |
| Myriam CHAPLAIN | I2M, Bordeaux | myriam.chaplain@u-bordeaux.fr |
| Bertrand CHARRIER | Iprem, Pau | bertrand.charrier@univ-pau.fr |
| Elie CHEYNEL | UM-msb, Montpellier | elie.cheynel@etu.umontpellier.fr |
| Antoine CHILLET | UM-msb, Montpellier | antoinechillet83@gmail.com |
| Yi Hien CHIN | I. Pascal, Clermont-Fd | yi_hien.chin@uca.fr |
| Bruno CLAIR | LMGC, Montpellier | bruno.clair@cnsr.fr |
| Thierry CONSTANT | Silva, Nancy | thierry.constant@inrae.fr |
| Christophe CORONA | LECA, Geneve | Christophe.corona@unige.ch |

| NOM Prénom | Labo/organisme (pays) | email |
|------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Guy COSTA | Labcis, Limoges | guy.costa@unilim.fr |
| Jean-Luc COUREAU | I2M, Bordeaux | jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr |
| Hugo CURIAL | Labomap, Cluny | Hugo.Curial@ensam.eu |
| Remi CURTI | ICA, Tarbes | remi.curti@laposte.net |
| Xavier DA COL | UM-msb, Montpellier | dacolxavier@gmail.com |
| Hussein DAHER | Navier, Champs-s-M | hussein.daher@enpc.fr |
| Nicolas DA SILVA | Fibois, Lyon | n.dasilva@fibois-aura.org |
| Annabelle DÉJARDIN | BioForA, Orléans | annabelle.dejardin@inrae.fr |
| Didier DELOURME | Labcis, Limoges | didier.delourme@unilim.fr |
| Aurore DELVART | Piveteau, Ste Florence | aurore.delvart@piveteau.com |
| Netih DEMBA | UM-msb, Montpellier | netihdemba@outlook.fr |
| Leyne DEMOULIN | Labomap, Cluny | leyne.demoulin@ensam.eu |
| Frédéric DUBOIS | GC2D, Egletons | frederic.dubois@unilim.fr |
| Cedric DUSSAUT | LGPM, Gif-sur-Yvette | cedric.dussaut@centralesupelec.fr |
| Serge EKOMY ANGO | LaReVa Bois, Libreville (GA) | ekomyango@yahoo.fr |
| Mohamed-Tahar ELAIEB | INRGREF, Tunis (TN) | ayeb2002@yahoo.fr |
| Arnauld ENGONGA EDZANG | PIAF, Clermont-Fd | arnauld.engonga-edzang@inrae.fr |
| Luis ESPINOSA | ICA, Tarbes | luis.espinosa@iut-tarbes.fr |
| Morel ESSONO MINTSA | LIMBHA, Nantes | morel.essonomintsa@esb-campus.fr |
| Florent EYMA | ICA, Tarbes | florent.eyma@iut-tarbes.fr |
| Laura FIGEL | Lermab, Epinal | laura.figel@univ-lorraine.fr |
| Emmanuel FOADIENG | ENSET Kumba, Buea (CM) | foidieng@yahoo.fr |
| Blaise FOUEDJOU | ENSPY, Yaoundé (CM) | blaise.fouedjou@polytechnique.cm |
| Emmanuel FREDON | Lermab, Epinal | emmanuel.fredon@univ-lorraine.fr |
| Justine FREULARD | ISTOM, Angers | j.freulard@istom.fr |
| Christelle GADY | Labcis, Limoges | christelle.gady@unilim.fr |
| Thomas GIORDANENGO | Radoux, Jonzac | t-giordanengo@radoux.fr |
| Pol GOBERT | UM-msb, Montpellier | polgobert@gmail.com |
| Giacomo GOLI | Dagri, Florence (IT) | giacomo.goli@unifi.it |
| Dalmer GOMEZ | ENPC, Marne-la-Vallée | dalmer.gomez@enpc.fr |
| Guilhem GREFFIER | ICA, Tarbes | guilhem.greffier@iut-tarbes.fr |
| Maxence GRENOT | UM-msb, Montpellier | maxgrenot@hotmail.fr |
| Joseph GRIL | I. Pascal, Clermont-Fd | joseph.gril@cnrs.fr |
| Daniel GUIBAL | Biowoeb, Montpellier | Daniel.guibal@cirad.fr |
| Claudia HALTER | UM-msb, Montpellier | claudia.halter@etu.umontpellier.fr |
| Alban GUYOT | Biowoeb, Montpellier | alban.guyot@cirad.fr |
| Jean-Marc HENIN | LTB, Gembloux (BE) | j.henin@cra.wallonie.be |
| Delphine JULLIEN | LMGC, Montpellier | Delphine.Jullien@umontpellier.fr |
| Cyril KACHOUH | Labomap, Cluny | cyril.kachouh@ensam.eu |
| Clément LACOSTE | PCH, Alès | clement.lacoste@mines-ales.fr |
| Solene LAETHIER | UM-msb, Montpellier | solene.laethier@outlook.fr |
| Helene LAGARDE | LIMBHA, Nantes | helene.lagarde@esb.fr |
| Francesca LANATA | LIMBHA, Nantes | francesca.lanata@esb-campus.fr |
| Anne LAVALETTE | Alt-RD, Bègles | anne.lavalette@alt-rd.com |
| Arnaud LECOURBE | UM-msb, Montpellier | lecourbea@gmail.com |
| Flore LEBRETON | LIMBHA, Nantes | flore.lebreton@esb-campus.fr |
| Mathis LECOQ | UM-msb, Montpellier | mathis.lecoq@etu.umontpellier.fr |
| Michael LECOURT | FCBA, Grenoble | michael.lecourt@fcba.fr |
| Marc LEFEVRE | Iron Rabbits, Nivillac | mlefevre21462@hotmail.fr |
| Yannig LEPECQ | UM-msb, Montpellier | yannig.lepecq@etu.umontpellier.fr |
| Blanca LEWO NKONDI | I. Pascal, Clermont-Fd (RDC) | blancalewo@gmail.com |
| Stephanie LHEZ | Labcis, Limoges | stephanie.lhez@unilim.fr |

| NOM Prénom | Labo/organisme (pays) | email |
|--------------------------|------------------------------|---|
| Atteb MAHAMAT SALEH | Pprime, Poitiers | atteib.mahamat.saleh.cheikhadine@univ-poitiers.fr |
| Hubert MAIGRE | Lamcos, Lyon | hubert.maigre@insa-lyon.fr |
| Fanny MALATIER | UM-msb, Montpellier | fanny.malatier@etu.umontpellier.fr |
| Souha MANSOUR | Biowoob, Montpellier | souha.mansour@cirad.fr |
| Caroline MARC | Labomap, Cluny | caroline.marc@ensam.eu |
| Thibault MARCEL-MATHEY | Labomap, Cluny | thibaud.marcel-mathey@ensam.eu |
| Bertrand MARCON | Labomap, Cluny | Bertrand.marcon@ensam.eu |
| Corinne MARTIN | Silva, Nancy | corinne.martin@agroparistech.fr |
| Patrick MARTIN | EXB, Bordeaux | patrick.martin@expertisebois.com |
| Victor MARY | UM-msb, Montpellier | mrictormary9@gmail.com |
| Florence MATHIEU | Fibois 42, St Etienne | mathieu.florence@hotmail.fr |
| Ivan MAZEL | ENSAG-AE&CC, Grenoble | ivan.mazel@gmail.com |
| Jean-Pierre MBAKIDI | ICMR, Reims | jean-pierre.mbakidi@univ-reims.fr |
| Jérémy MEHATS | Ipem, Pau | jme hats@univ-pau.fr |
| Franck MICHAUD | LIMBHA, Nantes | franck.michaud@esb-campus.fr |
| Louis MILHE | Labomap, Cluny | louismilhe@gmail.com |
| Leonie MOLARO-MAQUA | UM-msb, Montpellier | leonie.molaro-maqua@etu.umontpellier.fr |
| Cédric MONTERO | LMGC, Montpellier | cedric.montero@umontpellier.fr |
| Mathilde MONTIBUS | FCBA, Bordeaux | mathilde.montibus@fcba.fr |
| Rostand MOUTOU PITTI | I. Pascal, Clermont-Fd | rostand.moutou_pitti@uca.fr |
| Linda NASRI | ICA, Tarbes | linda.nasri@iut-tarbes.fr |
| Youri NAUDIN | UM-msb, Montpellier | naudinyouri@gmail.com |
| Anwar NEHLAWI | Lermab, Epinal | anwarnehlawi@hotmail.com |
| Estelle NKENE MZUI | Biowoob, Montpellier | esthernkenemezui@gmail.com |
| Zeinab OSMAN | Ipem, Pau | zeinabosm@yahoo.com |
| Sandrine PARADIS | Eveha, Limoges | sandrine.paradis@eveha.fr |
| Axel PEIGNON | ICA, Toulouse | peignon.axel@gmail.com |
| Patrick PELISSIER | Labcis, Limoges | patrick.pelissier@unilim.fr |
| Helene PENVERN | Labomap, Cluny | helene.de_sauvage@ensam.eu |
| Marianne PERRIN | ICA, Tarbes | marianne.perrin@iut-tarbes.fr |
| Elliot PHILIPPON | UM-msb, Montpellier | eliott.philippon7@gmail.com |
| Gilles PILATE | BioForA, Orléans | gilles.pilate@inrae.fr |
| Martin PILON | Lermab, Epinal | martin.pilon@univ-lorraine.fr |
| Laurence PODGORSKI | FCBA, Bordeaux | laurence.podgorski@fcba.fr |
| Regis POMMIER | I2M, Bordeaux | regis.pommier@u-bordeaux.fr |
| Clement PRUNIER | DRIVE, Dijon | clement.prunier@u-bourgogne.fr |
| Elysandre PUECH | Cepam, Nice | elysandre.puech@cepam.cnrs.fr |
| Tahiana RAMANANANTOANDRO | ESSA, Tananarive (MG) | ramananantoandro@gmail.com |
| Johan RAMAUX | Lermab / LRGP, Nancy | johan.ramaux@univ-lorraine.fr |
| Ylona RAMOND | UM-msb, Montpellier | ylona.ramond@etu.umontpellier.fr |
| Tiavina RANDRIAMBINTSOA | ESSA, Tananarive (MG) | randriambintsoat@gmail.com |
| Tojo RAVOAJANAHARY | Lermab, Epinal | tojo.ravoajanahary@groupesiat.fr |
| Romain REMOND | Lermab, Epinal | romain.remond@univ-lorraine.fr |
| Eduardo ROBLES | Ipem, Pau | eduardo.robles@univ-pau.fr |
| Jecolia ROLLE | UM-msb, Montpellier | jecolia.rolle@etu.umontpellier.fr |
| Christophe ROSE | Silva, Nancy | christophe.rose@inrae.fr |
| Frédéric ROUGER | FCBA, Champs-s-M | frederic.rouger@fcba.fr |
| Bernadette RUBIO | FCBA, Bordeaux | bernadette.rubio@fcba.fr |
| Julien RUELLE | Silva, Nancy | julien.ruelle@inrae.fr |
| Alexandre SANCHEZ | Ipem, Pau | alexandre.sanchez@univ-pau.fr |
| Jean -Baptiste SARRAUTE | UM-msb, Montpellier | je.sarraute@outlook.fr |

| NOM Prénom | Labo/organisme (pays) | email |
|---------------------------|--------------------------------|---|
| Nicolas SAUVAT | I. Pascal, Clermont-Ferrand | nicolas.sauvat@uca.fr |
| James SEUKAP | UM-msb, Montpellier | james.seukap-pancha@etu.umontpellier.fr |
| Yannick SIEFFERT | 3SR, Grenoble | yannick.sieffert@3sr-grenoble.fr |
| Merlin SIMO-TAGNE | Lermab, Epinal | merlin.simo-tagne@univ-lorraine.fr |
| Delin SOH MBOU | Labomap, Cluny | Delin.SOH_MBOU@ensam.eu |
| Sabine SOLOKWAN-LHERNOULD | Labcis, Limoges | sabine.solokwan-lhernould@unilim.fr |
| Isabela-Maria SOUZA-SILVA | CENA, Sao Paulo (BR) | isabela_souza@usp.br |
| Antoine STEPHAN | Lermab, Epinal | antoine.stephan@univ-lorraine.fr |
| Pierre SUDRE | UM-msb, Montpellier | pierre.sudre@etu.umontpellier.fr |
| Mokhfi TAKARLI | GC2D, Egletons | mokhfi.takarli@unilim.fr |
| Pierre-Kisito TALLA | L2MSP, Dschang (CM) | tpierrekisito@yahoo.com |
| Rémi TEISSIER DU CROS | Taransaud, Cognac | rteissierducros@taransaud.com |
| Marie-France THÉVENON | Biowoob, Montpellier | marie-france.thevenon@cirad.fr |
| Bernard THIBAUT | LMGC, Montpellier | bernard.thibaut@umontpellier.fr |
| Lucile TOUBLAN | UM-msb, Montpellier | lucile.toublan@gmail.com |
| Quentin TOURNADRE | UM-msb, Montpellier | quentin.tournadre@gmail.com |
| Orlane TOUZET | BioForA, Orléans | orlane.touzet@inrae.fr |
| Camille TRAMOND | UM-msb, Montpellier | camille.tramond@etu.umontpellier.fr |
| Rosilani TRIANOSKI | UFPR, Curitiba (BR) | rosilani@ufpr.br |
| Sarah TROILO | Lermab, Epinal | sarah.troilo@univ-lorraine.fr |
| Joris VAN-ACKER | Wood Technology Lab, Gent (BE) | Joris.VanAcker@UGent.be |
| Nicolas VILLANDIER | Labcis, Limoges | nicolas.villandier@unilim.fr |
| Marc VINCENT | Xylofutur, Bordeaux | marc.vincent@xylofutur.fr |
| Jerome VUILLEMIN | Qualitropic, La Réunion | jerome.vuillemin@qualitropic.fr |
| Mariem YAICH | Labomap, Cluny | Mariem.YAICH@ensam.eu |
| Rachida ZERROUKI | Labcis, Limoges | Rachida.zerrouki@unilim.fr |