HAL
open science

Actes des 7èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

Louis Denaud, Stéphane Girardon, Guillaume Pot, Joseph Gril

To cite this version:

Louis Denaud, Stéphane Girardon, Guillaume Pot, Joseph Gril (Dir.). Actes des 7èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois : À chacun sa ressource locale. 7, pp.336, 2018, Journées Annuelles du GDR3544 Sciences du Bois. hal-02103731

HAL Id: hal-02103731

https://hal.science/hal-02103731

Submitted on 18 Apr 2019

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

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

GDR 3544
Sciences du Bois

Actes des 7èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

Thème : À chacun sa ressource locale

20-22 novembre 2018

Campus Arts et Métiers de Cluny

Cluny, France

Manifestation : 7èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, Cluny, Nov. 2018

Collection : Journées annuelles du GDR 3544 sciences du bois, Volume 7, 2018

Coordination et édition des actes : Louis DENAUD (ENSAM Cluny), Stéphane GIRARDON (ENSAM Cluny), Guillaume POT (ENSAM Cluny), Joseph GRIL (Institut Pascal, Clermont-Ferrand)

Sommaire

Editorial **4**

Comité d'organisation et comité scientifique **7**

Soutiens et sponsors **8**

Programme **9**

Groupes de travail et atelier **10**

Visites **11**

Présentations orales invitées **12**

Session introductive **13**

Session 1 : Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui **17**

Session 2 : Forêts et bois de demain **23**

Session 3 : Adapter nos usages aux bois locaux **26**

Session 4 : Usages des bois de demain **29**

Sessions posters **36**

Session Poster A **43**

Session Poster B **116**

Session Poster C **190**

Session Poster D **254**

Liste des participants **330**

ÉDITORIAL

Le **Groupement de Recherche en Sciences du bois** (GDR3544 Sciences du Bois) a été créé en 2012 par le CNRS et renouvelé en 2016 pour 5 ans. La mission de ce groupement est : (1) de structurer la recherche sur le bois en France pour lui donner une visibilité nationale, (2) de contribuer au développement de la formation en sciences du bois et (3) de servir de relai aux réseaux internationaux de sciences du bois. Afin de répondre à ces objectifs, des journées scientifiques tournantes sont organisées chaque année dans un lieu caractérisé par une activité significative dans ce domaine. Elles permettent de partager une culture commune, promouvoir les travaux des laboratoires membres du GDR Bois, stimuler les échanges. Les trois journées sont ouvertes à tous les chercheurs intéressés par les sciences du bois, français comme étrangers ; l'objectif étant d'accueillir un maximum de participants des laboratoires partenaires du GDR Bois et de favoriser la participation des jeunes chercheurs (doctorants ou post-doctorants). Dans l'esprit du GDR Bois, nous souhaitons que tous les chercheurs assistent à l'ensemble des journées annuelles car l'objectif n'est surtout pas de cloisonner les thématiques mais bien au contraire de développer une culture commune en espérant stimuler l'interdisciplinarité et les transferts de savoir-faire et d'outils entre thématiques.

Les **7èmes journées annuelles du GDR Bois** ont été organisées dans l'Abbaye de Cluny, à **L'École nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM)** du 20 au 22 novembre 2018. Cette rencontre annuelle a rassemblé les membres de 38 organismes français et 8 étrangers. Elle a permis, au travers des **exposés des conférenciers invités**, d'évoquer les enjeux actuels et futurs de la filière forêt-bois autant que d'illustrer les diverses manières d'aborder l'étude du bois. Le thème retenu pour cette édition, « À chacun sa ressource locale », s'inscrit dans le développement du territoire régional mais peut se décliner à l'échelle nationale ou mondiale. Les participants ont pu échanger sur leurs travaux grâce aux présentations **"flash" appuyées par des posters** dont certains ont été primés par le biais d'un vote en ligne. Les actes de ces journées rassemblent les résumés des conférenciers invités (exposés) et ceux des contributions volontaires (posters). Les actes sont diffusés sur la plateforme HAL, sous forme de collection « Sciences du bois » qui est destinée à diffuser les travaux des membres du GDR.

Des créneaux pour des réunions **de groupes de travail** (GT) ont été aménagés. Ces GT sont mis en place par les participants aux journées et certains, devenus récurrents, donnent lieu à des réunions thématiques en dehors de ces rencontres annuelles. Une formation sur l'open access a été organisée en parallèle. Des visites en entreprise ont été également proposées, ou au choix celle de l'Abbaye et des laboratoires de recherche. .

Merci au personnel de l'ENSAM qui s'est mobilisé pour avoir organisé et accueilli cette manifestation et en garantir le succès.

Joseph GRIL, Directeur du GDR3544 Sciences du bois
Meriem FOURNIER, Directrice Adjointe

Site Web du GDR 3544 Sciences du bois : http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/
Compte twitter : https://twitter.com/gdrbois?lang=fr
Webmestre : **Corinne MARTIN**

Participants aux 7èmes Journées Annuelles du GDR3544 Sciences du Bois

Lauréats 2018 des prix posters

LABORATOIRE HOTE

Contact : Louis Denaud, louis.denaud@ensam.eu

Laboratoire organisateur : LaBoMaP Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, http://labomap.ensam.eu/

Site web des journées annuelles : https://gdrbois-2018.sciencesconf.org/

ILLUSTRATION 1ERE PAGE

Halle bois du campus Arts et Métiers de Cluny et images de feuilles placages ondulés crédit Arts et Métiers

EDITION

Version pour les actes des journées annuelles 2018 déposés dans la collection HAL « sciences du bois » : *https://hal.archives-ouvertes.fr/BOIS/*.

Date d'édition : Février 2019 – Auteurs : Guillaume Pot (LaBoMaP, Cluny), Joseph Gril (Institut Pascal, Clermont-Ferrand)

Exposés dans l'abbaye de Cluny

Sessions posters

Groupes de travail

Prix posters

Visite d'entreprise

Visite du LaBoMaP

COMITÉ D'ORGANISATION ET COMITÉ SCIENTIFIQUE

COMITE D'ORGANISATION

Coordinateur : Louis Denaud, LaBoMaP, Arts et Métiers - Cluny

- Robert Collet, LaBoMaP, Arts et Métiers – Cluny
- Fabrice Cottin, LaBoMaP, Arts et Métiers – Cluny
- Marjorie Curtil, Arts et Métiers - Cluny
- Fréderic Delmas, Arts et Métiers - Cluny
- Louis Denaud, LaBoMaP, Arts et Métiers - Cluny
- Marie-Pascale Gaudinet, Arts et Métiers - Cluny
- Stéphane Girardon, LaBoMaP, Arts et Métiers - Cluny
- Joseph Gril, Institut Pascal - Clermont-Ferrand
- Marie-Laure Louvrier, Arts et Métiers - Cluny
- Bertrand Marcon, LaBoMaP, Arts et Métiers - Cluny
- Guillaume Pot, LaBoMaP, Arts et Métiers – Cluny
- Thierry Ridet, Arts et Métiers - Cluny
- Emmanuel Trujillo, Arts et Métiers - Cluny

COMITE SCIENTIFIQUE

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

- Christophe Belloncle, ESB - Nantes
- Laurent Bléron, LERMAB - Epinal
- Sabine Caré, Navier - Champs sur Marne
- Myriam Chaplain, I2M - Bordeaux
- Bertrand Charrier, IPREM - Pau
- Bruno Clair, LMGC - Montpellier
- Thiery Constant, Silva - Nancy
- Louis Denaud, LaBoMaP - Cluny
- Eric Fournely, Institut Pascal - Clermont Ferrand
- Meriem Fournier, Silva - Nancy
- Philippe Gérardin, LERMAB - Nancy
- Stéphane Grelier, LCPO - Bordeaux
- Joseph Gril, Institut Pascal - Clermont-Ferrand
- Rémy Marchal, BioWooEB - Montpellier
- Corinne Martin, Silva - Nancy
- Emmanuel Maurin, LRMH - Champs sur Marne
- Patricia Roeckel-Drevet, PIAF - Clermont Ferrand
- Frédéric Rouger, FCBA - Bordeaux
- Nicolas Sauvat, GC2D - Egletons
- Isabelle Théry-Parisot, CEPAM - Nice
- Marie-France Thévenon, BioWooEB - Montpellier
- Stéphane Vaiedelich, Musée de la musique – Paris

SOUTIENS ET SPONSORS

L'ensemble des partenaires est remercié pour le soutien apporté à cette manifestation. Le GDR 3544 sciences du bois est soutenu principalement par le CNRS(http://www.cnrs.fr/), le Ministère de la Culture (http://www.culture.gouv.fr/), ainsi que par l'INRA (http://institut.inra.fr/). Les autres soutiens financiers et logistiques qui ont permis l'organisation de ces journées 2018 sont décrits ci-dessous.

Depuis sa création en 1780, Arts et Métiers s'attache à répondre aux défis industriels et aux enjeux sociétaux, en constante évolution. Sa première mission ? Former des ingénieurs spécialistes des technologies durables : des ingénieurs capables de concevoir des produits et systèmes respectueux de l'environnement, mais aussi de contrôler une organisation industrielle en maîtrisant les risques et les coûts.

Une région forte et fière de ses atouts. D'Auxerre à la frontière suisse, des vignobles du Chablis aux sommets du Jura, de Chalon dans la rue aux Eurockéennes, de l'Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports (ISAT) à Nevers à l'ENIL de Mamirolle… la région Bourgogne-Franche-Comté met ses atouts en commun pour être plus forte en Europe.

L'institut Carnot ARTS développe des compétences scientifiques et des travaux de recherche technologique permettant d'adresser les problématiques de conception, d'industrialisation et de fabrication de produits manufacturés pluri-technologiques complexes et innovants. Son implantation multirégionale, proche des milieux socio-économiques, permet à l'iC ARTS une proximité avec les entreprises (en particulier PME) et les pôles de compétitivité.

Cluny est une cité de facture médiévale de 5000 habitants. Elle est idéalement située à proximité des grands axe nord-sud (A31) et est-ouest (RCEA) tout en conservant un caractère rural sans nuisance. Une gare TGV dessert également son territoire. Cette situation désenclavée lui a permit de maintenir le dynamisme qu'elle tient de sa célèbre abbaye « Phare de l'occident », fondée en 910 par l'abbé Bernon et qui étendra peu à peu son rayonnement et son influence sur toute l'Europe.

PROGRAMME DES JOURNEES

MARDI 20 NOVEMBRE 2018

- 10h00-10h40 Accueil des participants, *café de bienvenue*
- 10h40-11h00 Ouverture des journées par Ivan Iordanoff (DGARI ENSAM)
- 11h00-12h30 Intoduction aux Journées par Joseph Gril et Louis Denaud : point sur les activités de sciences du bois passées et prévues, présentation du progamme
- 12h30-13h00 Exposé introductif de Jean-Luc Delpeuch et Loïc Muzy (Communauté de Communes du Clunisois) « Engagement des acteurs territoriaux dans la valorisation de la ressource locale et l'économie circulaire »
- 13h00-14h30 *Pause déjeuner*
- 14h30-15h30 **Session 1 Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui** : Exposés de Frédéric Epaud (CITERES Tours) « Innovations dans les charpentes gothiques : de la conduite des peuplements à la réalisation technique » et de et Jonathan Lenglet (AgroParisTech Nancy) « Les démarches de valorisation territoriale dans la filière bois : des outils de développement local et durable ? »
- 15h30-16h30 **Exposés flashs (A)**
- 16h00-17h00 *Pause café* + **session posters (A)**
- 17h30-19h30 Réunions des groupes de travail et ateliers de formation
- 20h00 *Réunion du comité de pilotage scientifique*

MERCREDI 21 NOVEMBRE 2018

- 08h30-09h30 **Session 2 Forêts et bois de demain :** Exposés de Patrick Fonti (WSL, Birmensdorf, CH) « Valorisation des bois locaux en emploi structurel : la piste du CLT et du LVL » et de Francis de Morogues (FCBA Grenoble) « Mobiliser les propriétaires forestiers privés aujourd'hui pour demain »
- 09h30-10h30 **Exposés flashs (B)**
- 10h30-11h30 *Pause café* + **session posters (B)**
- 11h30-12h30 **Session 3 Adapter nos usages aux bois locaux :** Exposé de Robert Collet et Louis Denaud (ENSAM, Cluny) « La filière bois mondiale : Eléments de prospective » et d'Antony Dufour (LRGP Nancy) « Valorisation énergétique et chimique du bois : mécanismes, procédés et filières »
- 12h30-14h00 *Pause déjeuner*
- 14h00-17h00 Visites (départ 13h30 pour les visites d'entreprises)
- 17h00-18h00 **Exposés flashs (C)**
- 18h00-19h00 *Pause café* + **session posters (C)**
- 20h00-23h00 *Dîner gala*

JEUDI 22 NOVEMBRE 2018

- 08h30-09h30 **Session 4 Usages des bois de demain :** Exposés de Marie-France Thévenon (BioWooEB Montpellier) « Préservation et durabilité des bois locaux » et de Stéphane Hameury (CSTB Marne la vallée) « La construction bois de grande hauteur : mythe ou réalité »
- 09h30-10h30 **Exposés flashs (D)**
- 10h30-11h30 Pause café + **session posters (D)**
- 11h30-13h00 Réunions des groupes de travail et ateliers de formation
- 13h00-14h30 *Pause déjeuner*
- 14h30-15h30 Prix poster – Conclusion et clôture. Intervention de Sylvain Mathieu (VP RBFC en Charge du bois et de la Forêt)
- 15h30-16h30 Réunion des représentants des équipes

(VENDREDI 23 NOVEMBRE 2018)

- 09h00-12h00 *Réunion du **GT Usinage***

GROUPES DE TRAVAIL ET ATELIER

GROUPES DE TRAVAIL

Onze **groupes de travail** (GT) ont été proposés pour cette 7ème édition des journées annuelles du GDR Bois, selon la liste définie ci-dessous. Ils ont été répartis sur deux créneaux prévus le 1er et le 3ème jour.

Ces GT sont mis en place par les participants aux journées. Certains, devenus récurrents, donnent lieu à des réunions thématiques en dehors de ces rencontres annuelles.

Pour plus d'information, voir :
http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/Presentation-generale/Groupes-de-travail

Certains GT possèdent leur page web sur le site du GDR (notés *), les comptes rendus des réunions sont disponibles sur : http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail

LISTE DES GT

- Groupe Usinage Bois (Florent Eyma) *
- Xylomat et projet In-Xylo (Bertrand Charrier) *
- Bois & Imagerie (Sabine Caré, Guy Costa, Evelyne Toussaint) *
- Xylothèque, collections et base de données (Emmanuel Maurin, Bernard Thibaut) *
- Rupture du Bois (Myriam Chaplain, Rostand Moutou Pitti, Frédéric Dubois) *
- Contrôle et évaluation non destructive du bois (Marianne Perrin) *
- Xylogenèse et ses déterminants (Thiery Constant, Annabelle Dejardin)
- Construction (Nicolas Sauvat, Eric Fournely) *
- SEHS usages et transformation du bois (Mériem Fournier)
- Sciences, artisanat, histoire (Iris Brémaud)
- Formation (Rémy Marchal)

ATELIER DE FORMATION

Un atelier de fomation sur l'***open access*** a été proposé en parallèle au 2ème créneau. Il a été assuré par François Gibier, documentaliste du LMGC Montpellier.

VISITES

Les visites ont été rendues possibles grâce à M. Patrice Colombo (Arbonis), Yves Ducerf, Karine Beurel et Thibault Chastagnier (Ducerf Groupe). Un grand merci pour la chaleur de leur acceuil et leur disponibilité tout au long de la préparation et de la visite.

VISITE DE L'ENTREPRISE ARBONIS (HTTP://WWW.ARBONIS.COM/)

Visite du site de production de Verosvres (71).

ARBONIS est un acteur majeur de la construction, spécialisé dans la structure bois, en France et à l'international. ARBONIS cumule « savoir-faire charpentier » et expertise industrielle pour concevoir et réaliser bâtiments et équipements, du plus simple au plus élaboré, intégrant le bois comme solution constructive partielle ou totale. ARBONIS est doté des outils, moyens et expertises nécessaires pour faire aboutir tout type de projet en lots séparés, macro lot ou tous corps d'état (construction entreprise générale bois et conception-construction).

VISITE DE L'ENTREPRISE DUCERF GROUPE (HTTPS://WWW.DUCERF.COM/)

Visite du site de production des Bois Profilés à Charolles (71).

Depuis 1962, l'unité de production des Bois Profilés est spécialisée dans la 2ème transformation des bois feuillus. Si les panneaux lamellés collés sont au cœur de sa production, cette branche du Groupe Ducerf propose d'autres produits variés de qualité, usinés et traités au moyen de technologies de pointe.

VISITE DE L'ABBAYE DE CLUNY

Visite des vestiges d'un centre spirituel, siège du plus grand ordre monastique médiéval d'Occident.

VISITE DU LABOMAP (HTTP://LABOMAP.ENSAM.EU/)

Visite du laboratoire hôte de ces journées.

Le Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LaBoMaP) regroupe au Campus Arts et Métiers ParisTech de Cluny, quatre équipes de recherche et de transfert sur le procédé d'usinage du bois vert et des matériaux métalliques avec comme transversalité la science des matériaux. Le laboratoire est une composante de l'institut Carnot « ARTS » et regroupe plus de 40 personnes. Il a été créé en 1993 et est reconnu équipe d'accueil (EA 3633) depuis 2002.

PRÉSENTATIONS ORALES INVITÉES

À chacun sa ressource locale

No	Laboratoire; ville (pays)	Auteur(s)	Titre
Session introductive			
0	C.C. Clunisois; Cluny	Delpeuch Jean-Luc, Muzy Loïc	Engagement des acteurs territoriaux dans la valorisation de la ressource locale et l'économie circulaire
Session 1 : Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui			
1a	Citeres; Tours	Epaud Frédéric	Innovations dans les charpentes gothiques. De la conduite des peuplements à la réalisation technique
1b	Silva; Nancy	Lenglet Jonathan	Les démarches de valorisation territoriale dans la filière bois : des outils de développement local et durable ?
Session 2 : Forêts et bois de demain			
2a	WSL; Birmensdorf (CH)	Fonti Patrick	Impact du changement climatique sur la formation du bois
2b	FCBA; Grenoble	De Morogues Francis	Mobiliser les propriétaires forestiers privés aujourd'hui pour demain
Session 3 : Adapter nos usages aux bois locaux			
3a	Labomap; Cluny	Denaud Louis, Collet Robert	Valorisation des bois locaux en emploi structurel : la piste du CLT et du LVL
3b*	Biowooeb; Montpellier	Thévenon Marie-France	Durabilité et protection des bois locaux
Session 4 : Usages des bois de demain			
4a*	LRGP; Nancy	Dufour Anthony	Valorisation énergétique et chimique du bois : mécanismes, procédés et filières
4b	CSTB; Marne-la-Vallée	Hameury Stéphane	La construction bois de grande hauteur : mythe ou réalité ?

** Les présentations 3b et 4a ont dues être interverties dans le programme des journées*

Session introductive

Engagement des acteurs territoriaux dans la valorisation de la ressource locale et l'économie circulaire, Delpeuch Jean-Luc et Muzy Loïc 13

Session introductive

Engagement des acteurs territoriaux dans la valorisation de la ressource locale et l'économie circulaire

DELPEUCH Jean-Luc[1], MUZY Loïc[1]

[1]Communauté de Communes du Clunisois, 71250 Cluny, France
jean-luc@delpeuch.eu ; charte-forestiere@enclunisois.com

La Communauté de Communes du Clunisois (CCC) est un territoire de 14 000 habitants, qui regroupe 42 communes autour de Cluny (5 000 h). La population moyenne des communes hors Cluny est de 200 habitants. La densité démographique est de 31 habitants par km², soit le quart de la densité moyenne en France. On est donc dans un territoire authentiquement rural.

Sur les 448 km² que couvre la communauté, 120 km² sont couverts de forêts, soit près du tiers de la superficie totale. La propriété forestière est à 55 % propriété privée et à 45 % propriété publique (35 % communale et 10 % domaniale (État)). Cette proportion de propriété forestière communale est deux fois supérieure à la moyenne nationale (15 %).

Le projet de territoire de la Communauté de Communes du Clunisois est centrée sur :

- le développement de l'économie circulaire : la communauté anime un pôle territorial de coopération économique, autour de la valorisation des ressources locales, la réutilisation et le recyclage,
- l'emploi local : la CCC est acteur du programme « Zéro chômeur de longue durée »,
- la lutte contre le changement climatique : la CCC est engagé dans un projet de Territoire à énergie positive,
- la préservation de la biodiversité : la CCC anime l'espace Natura 2000 de la Vallée de la Grosne, qui dispose d'une biodiversité extraordinaire,
- en liaison avec le campus Arts et Métiers de Cluny et le Collège européen de l'innovation territoriale (en cours de lancement sur le campus de Cluny avec l'Assemblée des Régions d'Europe), la Communauté de Communes du Clunisois est engagée dans une dynamique d'innovation territoriale ; elle a été préfiguratrice du programme « 1000 doctorants pour les territoires », animée par HESAM Université, l'Université fédérale dont l'Ecole d'Arts et Métiers est membre fondateur au niveau national.

La responsabilité des communes étant importante dans la gestion de la forêt, et cette thématique étant au croisement des axes prioritaires de son projet de territoire, la CCC s'est engagée dès 2012 dans l'élaboration d'une Charte forestière de territoire.

Cette dynamique a fédéré de nombreux acteurs :

- élus et services des collectivités territoriales,
- ONF,
- propriétaires forestiers et Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF),
- acteurs économiques et sociaux,
- association environnementales,
- chercheurs,
- entreprises de la filière bois,
- etc.

Le cadre d'action constitué défini par la Charte a été adopté en 2013, il sert dorénavant de référence pour la politique forestière de la Communauté de Communes. La CCC a embauché un technicien forestier qui anime la mise en œuvre de la Charte, sous l'autorité du vice-président en charge de l'agriculture, de la forêt et de l'environnement.

Parmi les actions prioritaires de la Charte, figurent :

- la dynamisation de la sylviculture,
- la formation des élus et autres acteurs de la filière à sa valorisation dans le respect des différentes vocations de la forêt,
- l'amélioration de la desserte des massifs forestiers,
- la restructuration de la propriété forestière privée (biens sans maîtres, bourse foncière etc.),
- la promotion des techniques sylvicoles et d'exploitation respectueuses de la préservation de la ressource et de l'environnement (futaie irrégulière, débardage à cheval, etc.),
- la promotion d'actions de protection de la faune et de la flore, dans le cadre du document d'objectif de Natura 2000 (acquisition et mise à disposition de kits de franchissement des ruisseaux lors de travaux forestiers),
- des actions de développement de filières locales de valorisation de la ressource bois, notamment pour l'utilisation en matériaux de construction.

Sur ce dernier point, la CCC est entrée, en 2017, en partenariat avec le Laboratoire Bois du Campus Arts et Métiers de Cluny, et la filiale AMValor, pour la réalisation d'une étude portant sur la valorisation de la ressource en feuillus de qualité secondaire pour la production de matériaux de construction en bois.

Cette étude d'un an est en cours d'achèvement.

A partir de billons de chêne de diamètre de 25 à 50 cm, prélevés dans les forêts communales, le Labo Bois a réalisé des plaques de LVL avec des plis de différentes épaisseurs, qui ont été délignées en carrelets.

L'étude a consisté à optimiser la technique de production de ce matériau, a en tester les caractéristiques mécaniques et à en étudier l'industrialisation, notamment en vue de la fabrication d'huisseries.

Sur le territoire du Clunisois, il existe une tradition de transformation du bois local en menuiseries et huisseries (la Menuiserie industrielle Pardon, devenue GIMM, devenue OXXO, actuellement propriété du groupe algérien CEVITAL est un des premiers employeurs du territoire (environ 300 salariés). Les huisseries, qui étaient à l'origine produites en bois local, ont ensuite eu recours aux bois exotiques, puis au PVC.

Un des buts de l'étude est d'étudier la possibilité de revenir à une ressource locale, économiquement abordable et techniquement pertinente, en prélevant la matière première sur des bois de qualité secondaire (bois d'éclaircie en particulier), qui auraient eu vocation à être utilisés en simple bois de chauffage.

Les premiers résultats de l'étude montrent que :

- le matériau qui a été mis au point à partir du chêne de qualité secondaire présente de très intéressantes caractéristiques mécaniques et esthétiques,
- qu'il est possible d'usiner et d'assembler les carrelets produits pour en faire des menuiseries dans de bonnes conditions,

- qu'il est possible de valoriser ainsi 20 à 25 % de la matière tirée des billons étudiés, ayant vocation, à défaut de ce type de valorisation innovante, à n'être utilisés qu'en production de plaquette forestière ou affouages.

A partir de cette première phase de l'étude, il devient possible d'aller plus avant dans la prise en compte économique de ce type de valorisation, en liaison avec des entreprises intéressées par la production locale des matériaux de construction et leur transformation.

Cette nouvelle phase de l'étude associera également l'équipe de recherche CESAER (Centre d'Economie et de Sociologie appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux) d'Agrosup Dijon, spécialisée sur la valorisation des ressources locales.

Session 1 :
Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui

Innovations dans les charpentes gothiques. De la conduite des peuplements à la réalisation technique, Epaud Frédéric 17

Les démarches de valorisation territoriale dans la filière bois : des outils de développement local et durable ?, Lenglet Jonathan 19

Session 1 : Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui

Innovations dans les charpentes gothiques. De la conduite des peuplements à la réalisation technique.

EPAUD Frédéric[1]

[1] CNRS, CITERES / Lab. Archéologie et Territoires, Tours
Frederic.Epaud@univ-tours.fr

Avec l'avènement de l'architecture gothique et le renouvellement des formes architecturales à partir de la seconde moitié du XIIe siècle, les maîtres charpentiers se voient confrontés à de nouveaux défis comme la réduction en épaisseur des murs porteurs ou le redressement de la pente des toits. La structure des charpentes se modifie radicalement par rapport à celle des charpentes romanes avec notamment l'apparition de la travée. Les poussées générées sur les murs par ces nouvelles structures vont susciter une série d'innovations techniques pour tenter de stabiliser au mieux ces charpentes encore mal conçues. Plusieurs charpentes se voient donc consolidées quelques décennies seulement après leur mise en œuvre, témoignant des limites techniques et conceptuelles des maîtres charpentiers. Au début du XIIIe siècle, on voit apparaître dans les charpentes des cathédrales des dispositifs inédits pour la plupart expérimentaux qui tentent de répondre aux difficultés inhérentes au gigantisme de ces édifices, avec plus ou moins de succès.

La multiplication des chantiers aux XIIe-XIIIe siècles et surtout le gigantisme de certains d'entre eux comme la reconstruction dans le style gothique de la plupart des cathédrales et des abbayes vont présenter de nouveaux défis aux maîtres d'œuvre pour répondre à ces importants besoins en bois d'œuvre, tant en quantité qu'en qualité.

A travers l'étude archéologique de plusieurs charpentes d'édifices gothiques, et surtout celle du XIIIe siècle de la cathédrale de Bourges, de plus de 100 m de longueur, nous aborderons les questions liées à l'approvisionnement en bois d'œuvre, aux types de bois consommés, à leur provenance, leur stockage, leur traitement, au profil des chênes abattus (morphologie, croissance, âge…) et par là même aux forêts exploitées au XIIIe siècle.

A travers cet exemple et plusieurs autres études de cas en Normandie et en Ile de France, nous essayerons de restituer les modalités de gestion sylvicoles pratiquées aux XIIe-XIIIe siècles dans les futaies seigneuriales du bassin parisien qui ont permis de répondre aux énormes besoins en bois d'œuvre des chantiers de construction de cette période gothique.

Session 1 : Bois locaux d'autrefois et d'aujourd'hui

Les démarches de valorisation territoriale dans la filière bois : des outils de développement local et durable ?

LENGLET Jonathan[1]

[1]Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR LADYSS
jonathan.lenglet@agroparistech.fr

Mots clefs : Filière forêt-bois ; territorialisation ; écologisation ; innovation, transition

Introduction

Depuis plusieurs années maintenant, les acteurs traditionnels du secteur forêt-bois semblent se saisir avec entrain des questions territoriales et environnementales comme d'un nouveau levier de développement. Dans le même temps les collectivités et d'autres acteurs du territoire, comme les Parcs Naturels Régionaux, tentent d'inclure de manière plus importante les filières forêt-bois – à priori peu ou pas délocalisables – dans leurs stratégies locales. Si l'amont forestier est largement mobilisé dans les discours, le segment aval de transformation et de commercialisation du bois est longtemps resté en retrait de ce type de démarche. Cependant, des changements dans les attentes des consommateurs (retour de la proximité, responsabilité sociale et environnementale) et la remise en cause de certains modèles de production s'avèrent être un terreau fertile pour l'émergence d'expériences alternatives au système dominant. Dans ce contexte, auquel s'ajoute une certaine régionalisation de l'action publique, le bois a tendance à revenir sur le devant de la scène comme matériau porteur de solutions au niveau local, à la fois dans le secteur de la construction et dans le secteur énergétique où la transition amorcée rebat les cartes de l'organisation territoriale.

Une grande diversité dans les formes de valorisation des bois locaux

La mise en valeur des produits bois issus d'un territoire peut prendre des formes variées : actions de communications, labellisation, certification ou encore AOC se font de plus en plus nombreuses (Tab. 1). Cette diversité est révélatrice des nombreux acteurs et de leur stratégies, parfois très différentes, impliqués dans la création de nouvelles ressources et la recherche de valeur ajoutée. Valoriser un produit par une démarche territoriale répond avant tout à une exigence de visibilité, d'identification pour le territoire mais aussi vis-à-vis l'extérieur. La construction de la spécificité d'une ressource a pour objectif sa démarcation sur l'offre globale de produits techniquement similaires (Pecqueur, 2007). Si ces pratiques sont répandues dans le secteur agricole et alimentaire, avec des résultats parfois très satisfaisants, leur transposition aux produits bois n'est pas évidente et, pour certains, contre nature. En effet, les matériaux de construction ou les sources d'énergie, comme peut l'être le bois, ne bénéficient pas aujourd'hui de la même portée symbolique que celle véhiculée par les produits alimentaires, véritables « repères identificatoires » des individus (Muchnik *et al.*, 2007). Néanmoins nous observons, depuis le début des années 2010, une multiplication des labels, notamment en France, Belgique, Autriche, Suisse et Allemagne.

Ces initiatives poursuivent des objectifs variés comme le respect d'un cahier des charges pour la commercialisation des sciages (Sélection Vosges et Jura Supérieur), la promotion d'une essence particulière (Sapin du Jura), la stimulation de l'innovation technique et territoriale (Terres de Hêtre) ou encore l'assurance d'une traçabilité claire à différentes échelles (Bois du

Jura, Bois de Chartreuse, Certificat d'origine Bois Suisse). Si, pour toutes, la provenance n'est pas un critère mis en avant, ces actions ont en commun l'appui fort qu'elles prennent sur un territoire d'origine bien identifié, permettant une structuration efficace mais générant aussi des retombées directes et indirectes sur ce dernier. Ces modes de valorisation permettent en partie la construction collective d'une production spécifique, c'est-à-dire à l'activation une ressource territoriale partagée (matérielle ou non, cette dernière pouvant être un savoir-faire particulier par exemple). Cette spécification de la production, à travers un argumentaire technique, culturel ou environnemental, permet de réinsuffler localement une dynamique supposée perdue tout en générant une plus-value économique et territoriale dans une démarche d'ouverture.

Tab. 1 : Principales initiatives de valorisation des bois locaux en France et pays proches (d'après Lenglet, 2018)

Initiative	Pays	Type	Porteur
Holz von Hier	Allemagne	Action	
Vorarlberg Holz	Autriche	Certification	Région
Bergholz	Autriche	Labellisation	Entreprise
Bois local	Belgique	Labellisation	Région
Bois de Chartreuse	France	AOC	PNR
Bois du Jura	France, Suisse	AOC	Association
Sapin du Jura	France	Action	Interprofession
Terres de Hêtre	France	Action	Collectivité terr.
Bois français	France	Action	Interprofession
Sélection Vosges	France	Certification	Asso./Interpro.
Jura Supérieur	France	Certification	Asso./Interpro.
Bois Qualité Savoie (BQS)	France	Certification	Entreprises
Bois des Alpes	France	Certification	Entreprises
Bois d'ici	France	Labellisation	Interprofession
Certificat d'origine bois suisse	Suisse	Certification	Etat fédéral

La promotion des circuits courts : le développement de projets bois local

La valorisation des ressources locales présente le double avantage de générer de la valeur et de l'activité sur un territoire donné tout en répondant à un certain nombre d'attentes des collectivités en termes de réappropriation des leviers de développement, notamment durable. Cette démarche nécessite une bonne articulation entre les entreprises et les porteurs de projet au niveau politique, notamment parmi les élus locaux. À ce titre, la Fédération nationale des communes forestières (FnCoFor), relayée par ses unions régionales, assure un soutien engagé au travers de nombreuses initiatives et communications en faveur des bois locaux, visant à en faire un véritable levier de développement territorial. Néanmoins, étant donné le surcoût généré, une volonté politique forte est requise et il est souvent présenté comme une nécessité pour le secteur public d'assurer ce rôle pionnier. Ces projets de démonstration (Späth et Rohracher, 2012) se traduisent la plupart du temps par la construction de bâtiments publics en bois local. Des adaptations sont nécessaires afin de lever les freins à ce type de fonctionnement et notamment pour « contourner » la réglementation sur la libre concurrence dans la réponse aux appels d'offre des marchés publics. En effet, la réglementation européenne, transposée dans l'article 6 du Code des marchés publics stipule en effet que « les spécifications techniques ne peuvent pas faire mention d'un mode ou procédé de fabrication particulier ou d'une provenance ou origine déterminée ». Cette contrainte est longtemps apparue comme un problème aux décideurs et aux entreprises souhaitant favoriser l'économie et les ressources locales. Différentes solutions existent, parmi lesquelles le fait pour le maitre

d'œuvre (la commune) de mettre la matière première nécessaire au projet (le bois) à disposition du maitre d'ouvrage (l'entreprise). Néanmoins cette adaptation prive la commune du revenu de ses bois et pose la question de la disponibilité de la ressource mais aussi de sa qualité. Une autre possibilité consiste à stipuler dans le cahier des charges la nécessité d'obtenir une certification particulière pour les matériaux utilisés. C'est ainsi qu'une certification ou une AOC intégrant des spécifications de provenance peut indirectement réorienter les appels d'offre vers les ressources et les entreprises d'un territoire particulier (qui n'est pas nécessairement celui où se réalise le projet).

Néanmoins, cette tendance au développement de modèles alternatifs intégrant considérations écologiques et développement local, si elle se retrouve dans la diversité des projets portés par les acteurs publics et privés, n'est pas nécessairement consensuelle dans sa mise en pratique. La diffusion de l'innovation ou sa généralisation sont dans un premier temps dépendantes de sa stabilisation et de sa légitimation auprès des autres acteurs. Ces deux points nécessitent la mise en place d'une solide gouvernance *ad hoc* pour assurer la réussite des projets (Kébir *et al*, 2017). La légitimation de l'innovation et la génération d'externalités positives ne sont pas non plus des conséquences automatiques. Elles dépendent notamment de l'attitude qu'adoptent un certain nombre de *gatekeepers* - pouvant être des élus, des associations environnementales ou encore des syndicats ou des structures interprofessionnelles - vis-à-vis de la démarche entreprise ou de la collectivité et de ses implications réelles ou supposées. Nous résumons ce processus d'émergence et de stabilisation à travers cinq étapes : identification, impulsion, mobilisation, réalisation et diffusion (Fig. 1).

Processus d'innovation	Construction bois local	Labellisation
1. Identification Dysfonctionnement environnemental, social, économique ou technique	Capacité d'action sur le développement local Ancrage de l'activité sur le territoire	Contrôle sur les modes de production Contrôle sur les modes de valorisation
2. Impulsion du projet	Collectivités	Collectivités, producteurs ou transformateurs
3. Mobilisation Ressources Coordination	 Identifier et mobiliser les ressources territoriales ou non (bois, savoir-faire, financement) Projet multi-acteurs (collectivités, entreprises, financeurs, recherche…)	 Révéler et activer les ressources territoriales (spécification du produit) Gouvernance *had-hoc* (territoriale, sectorielle ou intersectorielle)
4. Réalisation	Construction d'un bâtiment public en bois local	Lancement de la marque ou du label
5. Diffusion Légitimation Externalités positives	 Projet de démonstration, rôle essentiels des *gatekeepers* Retombées en termes d'image, fonctionnement en circuit-court	 Demande des consommateurs, adhésion des producteurs Revalorisation des produits, généralisation de la démarche (banalisation de l'innovation)

Fig. 1 : Processus d'émergence et de mise en place de l'innovation durable. Exemples de la construction bois locale et des démarches de labellisation (d'après Lenglet et Caurla, *à paraître*)

Si ces actions sont souvent présentés comme des solutions, leur mise en place se heurte aussi à certaines limites, du fait de leur acceptation par les différents acteurs, nous l'avons vu, mais aussi sur le plan de l'évaluation de telles démarches. En effet, rares sont les outils qui

permettent de réellement apprécier les conséquences de ces projets. Certaines actions, comme celles entreprises par les interprofessions forêt-bois d'Isère et de Bourgogne-Franche-Comté avec la mise au point d'un "indice de proximité", proposent par exemple le développement d'indicateurs à la fois du degré de territorialisation et d'écologisation mais ne fournissent pas encore de méthode globale pour l'évaluation et la quantification de ces processus.

A travers ces processus, le bois devient porteur de valeurs territoriales et écologiques, internalisant de fait un certain nombre de facteurs productifs ou culturels (provenance, histoire, paysages, savoir-faire, caractère renouvelable). Sur cette base, une coordination d'acteurs adéquate peut positionner le territoire comme lieu pertinent de la spécification des ressources bois et de la transition vers un modèle de fonctionnement alternatif, à la fois local et écologique. Cependant ces initiatives ne peuvent pas tout et sont pour la plupart encore au stade de projet ou peinent à se développer. La question n'est alors pas de savoir si ces alternatives vont se généraliser mais dans quelle mesure elles risquent d'être rejetées ou au contraires intégrées dans le modèle dominant.

Références

Kebir, L., Crevoisier, O., Costa, P., Peyrache-Gadeau, V. (2017). Sustainable innovation and regional development: rethinking innovative milieus. New horizons in regional science. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 267 p.

Lenglet, J. (2018), « Réorganisation institutionnelle et recomposition territoriale de la filière forêt-bois française : exemples du Grand-Est et de la Franche-Comté ». Annales de Géographie, n° 721 (3), p. 254-278.

Lenglet, J., Caurla, S. (à paraître), « Territorialisation et écologisation dans la filière bois : une rencontre fortuite ? ».

Muchnik, J., Requier-Desjardins, D., Sautier, D., Touzard, J-M. (2007), « Indtroduction : les Systèmes agroalimentaires localisés (SYAL) », Économie et Société, série « Systèmes agroalimentaires », n° 29 (9), p. 1465-1484.

Pecqueur, B. (2007), « L'économie territoriale : une autre analyse de la globalisation ». L'Économie politique, n° 33 (1), p. 41.-52.

Session 2 :
Forêts et bois de demain

Impact du changement climatique sur la formation du bois, Fonti Patrick 23

Mobiliser les propriétaires forestiers privés aujourd'hui pour demain, De Morogues Francis 25

Session 2 : Forêts et bois de demain

Impact du changement climatique sur la formation du bois

FONTI Patrick[1]

[1] WSL, Birmensdorf ZH, CH
patrick.fonti@wsl.ch

La formation du bois dépend des conditions environnementales dans lesquelles les arbres croissent. Le bois est le produit d'un méristème, le cambium, qui a besoin d'importantes ressources pour bien fonctionner. Ces ressources sont principalement des sucres nécessaires à la construction des cellules, mais elles incluent aussi la chaleur, la pression turgide et le temps pour que le processus de formation des cellules ligneuses se déroule de façon optimale.

Cette présentation va montrer comment il est possible d'étudier l'effet de l'environnent sur le processus de formation du bois et comment le changement climatique en cours va probablement affecter non seulement la quantité de bois produite mais aussi sa structure, son fonctionnement, et ses propriétés.

Session 2 : Forêts et bois de demain

Mobiliser les propriétaires forestiers privés aujourd'hui pour demain

DE MOROGUES Francis[1]

[1] FCBA, Domaine Universitaire – CS 90251, 38044 Grenoble, France
Francis.DE.MOROGUES@fcba.fr

Aujourd'hui, l'essentiel des volumes de bois exploitables en France est présent dans les propriétés privées. Cependant, elles se caractérisent par leur fragmentation en petites parcelles mais aussi par une grande hétérogénéité de ses propriétaires.

Ainsi, inciter à la vente de bois par un prix attractif ne correspond pas à la diversité des motivations des propriétaires. En effet, 66 % des propriétaires forestiers privés déclarent que l'attachement affectif constitue l'une de leurs deux principales attentes vis-à-vis de leur forêt. Cela rend complexe la relation commerciale.

Pour demain et le devenir de la biodiversité, le caractère monétaire des incitations à sa protection crée un « effet d'éviction » auprès des propriétaires ; c'est-à-dire réduit leurs comportements de protection dus aux motivations d'attachement à la forêt ou de besoin de maitrise de son bien.

Ainsi, mobiliser les propriétaires privés aujourd'hui et demain, réclame d'ouvrir le spectre des modalités d'incitations au-delà de la sphère économique.

Session 3 :
Adapter nos usages aux bois locaux

Valorisation des bois locaux en emploi structurel : la piste du CLT et du LVL, Collet Robert et Denaud Louis 26

Durabilité et protection des bois locaux, Thevenon Marie France 28

Session 3 : Adapter nos usages aux bois locaux

Valorisation des bois locaux en emploi structurel : la piste du CLT et du LVL

COLLET Robert[1], DENAUD Louis[1]

[1] LaBoMaP, Arts & Métiers ParisTech, rue Porte de Paris, 71250 Cluny, France
robert.collet@ensam.eu louis.denaud@ensam.eu

La grande majorité des bois destinés à un usage structurel sont issus de résineux des pays du Nord. Cependant le potentiel d'accroissement de la ressource forestière de bois d'œuvre résineux en Europe risque de limiter le développement du bois dans la construction. En France, les forêts sont constituées de près de 70 % de feuillus dont une part importante est sous exploitée. Parallèlement, les résineux à croissance rapide plus hétérogènes que les bois du Nord et les très gros bois noueux délaissés par les grandes scieries industrielles représentent aussi une ressource disponible à valoriser pour des emplois dans la construction.

Un premier frein à leur usage réside dans la faible efficience de la méthode visuelle pour le classement de leur résistance mécanique. Les normes de dimensionnement des structures et de contrôles des procédés pour la fabrication de produits techniques doivent aussi être adaptées et mieux optimisées pour ces bois. Le troisième enjeu est lié à la nature de cette ressource de qualité secondaire qui présente de fortes hétérogénéités (densité, nodosité, angle du fil…), ce qui nécessite la mise au point de produits reconstitués à partir de sciages (BLC, CLT) ou de placages (LVL) pour offrir des matériaux avec des performances mécaniques maîtrisées et une bonne stabilité dimensionnelle.

Session 3 : Adapter nos usages aux bois locaux

Durabilité et protection des bois locaux

THEVENON Marie-France[1,2]

[1]CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France
[2]BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
marie-france.thevenon@cirad.fr

Mots clefs : Bois local, valorisation, durabilité naturelle, préservation, protection, normalisation

Les usages intensifiés du matériau bois, les préoccupations environnementales ainsi que les besoins de développement économiques ont fait (ré-)émerger la notion de « Bois Local ». Dans un contexte de marché local, tout comme dans un contexte globalisé, le bois n'en reste pas moins un matériau biodégradable, or la durabilité est un verrou technologique important.

Bien évaluer, bien connaître, et faire reconnaître la durabilité naturelle de la ressource locale est devenu essentiel, afin de mieux la valoriser. Lorsque la durabilité naturelle de cette ressource n'est pas en adéquation avec les attentes du marché, il est alors possible de lui conférer une durabilité naturelle plus élevée, de manière « classique » à l'aide de produits de préservation, ou, en utilisant une méthode de protection (modification thermique, chimique…).

Ces aspects seront illustrés par divers exemples, tant de durabilité naturelle que de préservation/protection de certaines ressources locales, et, un point sur les aspects normatifs et réglementaires sera aussi effectué.

Session 4 :
Usages des bois de demain

Valorisation énergétique et chimique du bois : mécanismes, procédés et filières, Dufour Anthony 29

La construction bois de grande hauteur : mythe ou réalité ?, Hameury Stéphane 34

Session 4 : Usages des bois de demain

Valorisation énergétique et chimique du bois : mécanismes, procédés et filières

DUFOUR Anthony[1]

[1]LRGP, CNRS, Université de Lorraine, ENSIC, Nancy
anthony.dufour@univ-lorraine.fr

Mots clefs : thermochimie ; énergie ; bio-raffinerie ; pyrolyse ; gazéification ; liquéfaction

Introduction

Le bois est une source d'énergie depuis le début de l'humanité. Les filières « bois-énergie » ou « bois-raffinerie » connaissent des regains d'intérêts cycliques en fonction des guerres, du prix du pétrole et plus récemment pour tenter de réduire le réchauffement climatique.

Durant cette conférence, nous présenterons comment on peut « déconstruire » le bois pour produire des vecteurs énergétiques ou des molécules à haute valeur ajoutée. Nous présenterons des résultats obtenus à Nancy avec plus de 50 collaborateurs durant les 10 dernières années.

Nos activités de recherche portent sur la conversion thermochimique de la biomasse, et surtout du bois, en vecteur énergétique (électricité, CH_4, H_2, carburant liquide) et en molécules chimiques d'intérêts (composés aromatiques de type benzène, phénols ou furaniques, etc.). Les principales voies étudiées sont résumées sur la figure 1.

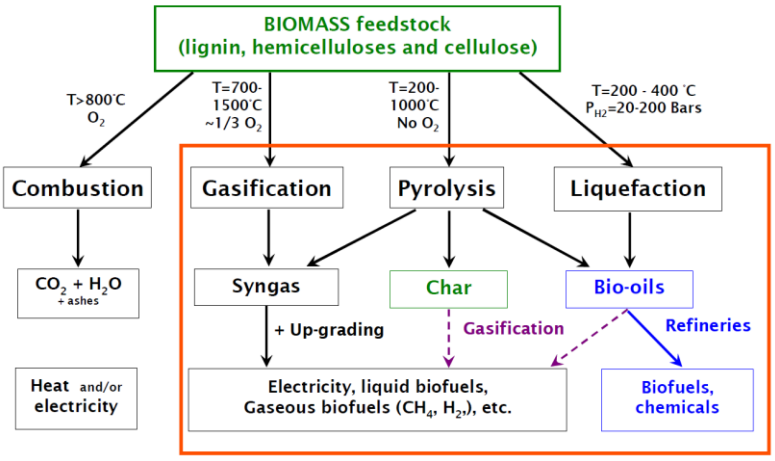


Fig. 1 : Principaux procédés de valorisation du bois étudiés au LRGP

Nous étudions surtout la pyrolyse, la liquéfaction et la gazéification du bois. Les principaux enjeux pour ces filières sont (1) de comprendre et réduire la production de goudrons qui polluent le gaz de synthèse dans les procédés de gazéification, (2) d'améliorer le rendement en bio-huiles et leur qualité (notamment réduire leur teneur en oxygène) pour les procédés de pyrolyse rapide et de liquéfaction.

Nous essayons de développer une activité allant des mécanismes moléculaires (chimie de la pyrolyse) à l'analyse globale des filières forêts-énergie. Ces différentes échelles d'investigation sont illustrées sur la figure 2.

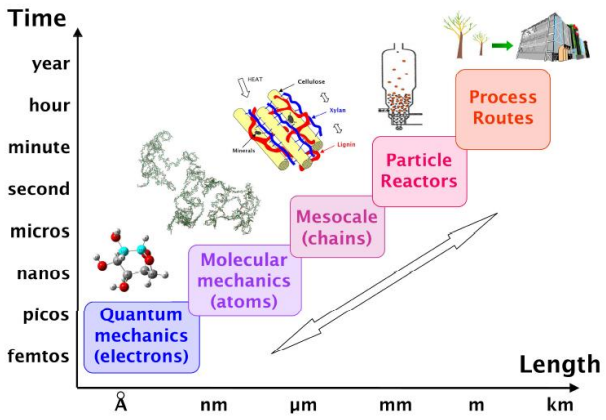


Fig. 2 : Les différentes échelles d'investigation illustrées pour la conversion thermochimique de la biomasse

Durant cette conférence, nous illustrerons nos travaux en partant de l'échelle moléculaire puis nous poursuivrons à l'échelle de la particule, des réacteurs et enfin de la filière.

Etudes à l'échelle moléculaire

Lorsqu'on chauffe le bois, les macromolécules (cellulose, lignine, hémicelluloses) présentes dans ces parois se dépolymérisent à partir de 150°C et jusqu'à environ 500°C. Le bois forme alors des gaz, des goudrons (ou bio-huile) et du charbon. Nous avons développé des méthodes originales pour étudier les réactions de pyrolyse comme des analyses *in-situ* par RMN et rhéologie (Dufour et al., 2012, Shrestha et al., 2017), des analyses en ligne des goudrons par spectrométrie de masse avancée (Jia et al., 2016, 2017) ou encore des analyses par RMN du solide du bois et du charbon (Le Brech et al., 2016).

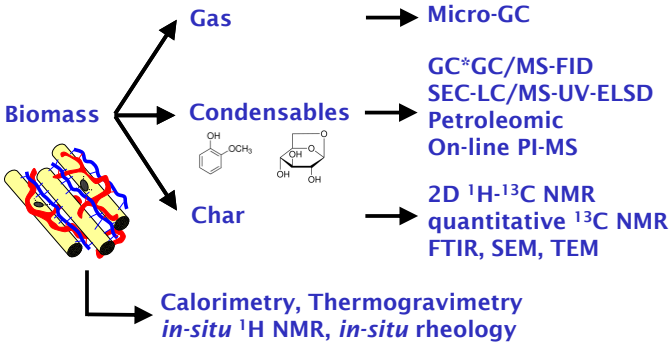


Fig. 3 : Différentes méthodes d'analyses des produits de pyrolyse développées au LRGP en collaboration avec de nombreux autres laboratoires

Etudes à l'échelle de la particule de bois

Ces réactions sont mises en jeu dans une particule de bois avec une structure poreuse complexe. Il faut donc caractériser et maîtriser les transferts de chaleur et de matière dans cette structure. Pour ce faire, nous développons des bancs d'essais spécifiques notamment par chauffage laser (figure 4).

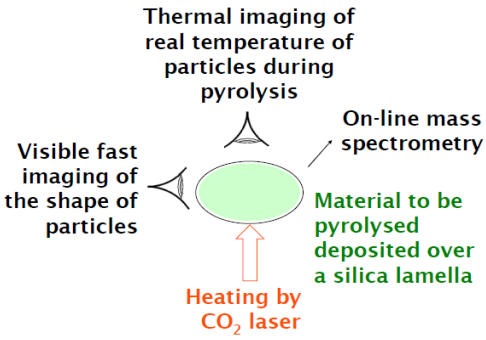


Fig. 4 : Principe d'une pyrolyse laser avec une imagerie simultanée de la température, de la forme des particules et analyse en ligne des volatiles par spectrométrie de masse

Etudes à l'échelle des réacteurs

Ces études à l'échelle des molécules et des particules ont pour objectif d'optimiser les réacteurs, par exemple d'améliorer la qualité des gaz ou des bio-huiles en contrôlant les conditions hydrodynamiques et de transferts.

Nous étudions particulièrement à Nancy les lit fluidisés : à l'échelle du gramme (micro-lit fluidisé) (Jia, 2015) au kilogramme (Lardier, 2016). Nous présenterons un exemple de réacteur totalement instrumenté et construit par nos ateliers du LRGP. Ce type de réacteur permet d'accompagner des industriels français.

D'autres réacteurs sous pression sont développés afin de désoxygéner les bio-huiles.

Etudes à l'échelle de la filière forêts-énergie

Ces réacteurs sont modélisés et intégrés à l'ensemble du procédé de valorisation du bois. Nous développons des modèles de procédés sous le logiciel Aspen Plus®. Ce logiciel permet d'obtenir un bilan matière et énergie rigoureux du procédé. De plus, nous intégrons la filière bois, depuis le sol jusqu'aux différents usages du bois en collaboration avec M. Fortin du laboratoire Silva (François, 2014) (figure 5). Ces modèles permettent ensuite d'étudier l'analyse du cycle de vie des filières.

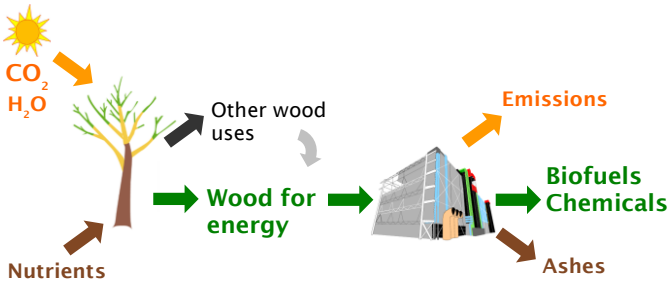


Fig. 5 : Représentation simplifiée de la filière forêt-énergie

Nous conclurons cette conférence sur des aspects sociétaux car toutes nos recherches sont vaines si elles ne sont pas en adéquation avec les besoins et avec la perception de la société. Une « bois-raffinerie » aux meilleurs rendements économiques et environnementaux ne sera peut-être jamais installée si elle n'est pas bien perçue par la société civile…

Conclusion

Le bois-énergie est un « vieux sujet » qui redevient d'actualité de manière cyclique le plus souvent en période de crise. Il est donc important d'étudier l'histoire de son développement. On a parfois oublié des développements industriels de pointe, qu'il faudrait se réapproprier…

La majorité des concepts de procédé a été pensée dans les années 60-70. Il est donc difficile d'innover sur ce sujet. Néanmoins les apports de la chimie analytique et de l'informatique permettent une meilleure compréhension des mécanismes et donc d'améliorer les réacteurs.

Le bois est un « trésor » de fonctions chimiques. Il pourrait être mieux valorisé dans des filières bien intégrées, qui peuvent être créatrices d'emplois et de richesse pour nos territoires.

Remerciements

Je remercie l'ensemble des collaborateurs (+ de 50 personnes), auteurs des publications citées. Merci au CNRS, à l'ANR, l'ADEME, la Région Lorraine puis Grand Est et à nos partenaires industriels pour leurs financements à travers différents projets.

Références

Dufour* A., Castro-Díaz M., Marchal P., Brosse N., Olcese R., Bouroukba M., Snape C.E., (2012) In-situ analysis of biomass pyrolysis by high temperature rheology in relations with 1H NMR, Energy & Fuels, 26 (10), 6432-6441.

François, J., Fortin, F., Patisson, F., Dufour*, A., Assessing the fate of carbon and nutrient in the bioenergy chain by modelling biomass growth and conversion, Environmental Science & Technology, 48 (23), 14007-14015, 2014.

Jia, L.Y., Le Brech, Y., Shrestha, B., Bente-von Frowein, M., Ehlert, S., Mauviel, G., Zimmermann, R., Dufour*, A. (2015) Fast Pyrolysis in a Microfluidized Bed Reactor: Effect of Biomass Properties and Operating Conditions on Volatiles Composition as Analyzed by Online Single Photoionization Mass Spectrometry, Energy & Fuels, 29 (11), 7364-7374.

Jia, L.Y., Le Brech, Y., Mauviel, G., Qi, F., Bente-von Frowein, M., Ehlert, S., Zimmermann, R., Dufour*, A., (2016) On-line analysis of biomass pyrolysis tar by photoionization mass spectrometry, Energy & Fuels, invited review, 30 (3), 1555-1563.

Jia, L.Y., Buendia-Kandia, F., Dumarcay, S., Poirot, H., Mauviel, G., Gérardin, P., Dufour, A.* (2017) Fast Pyrolysis of Heartwood, Sapwood, and Bark: A Complementary Application of Online Photoionization Mass Spectrometry and Conventional Pyrolysis Gas Chromatography, Energy&Fuels 31(4), 4078-4089.

Lardier, G., Kaknics, J., Dufour, A., (...), Poirier, J., Mauviel*, G., (2016) Gas and Bed Axial Composition in a Bubbling Fluidized Bed Gasifier: Results with Miscanthus and Olivine, Energy & Fuels, 30 (10), 8316-8326.

Le Brech, Y., Raya, J., Delmotte, L., (...), Gadiou, R., Dufour*, A. (2016) Characterization of biomass char formation investigated by advanced solid state NMR, Carbon, 108, 165-177.

Shrestha, B., Le Brech, Y., Ghislain, T., Leclerc, S., Carré, V., Aubriet, F., Hoppe, S., Marchal, P., Pontvianne, S., Brosse, N., Dufour*, A. (2017) A Multitechnique Characterization of Lignin Softening and Pyrolysis, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(8), 6940-6949.

Session 4 : Usages des bois de demain

La construction bois de grande hauteur : mythe ou réalité ?

HAMEURY Stéphane[1]

[1]Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
stephane.hameury@cstb.fr

Mots clefs : construction bois ; bâtiments de grande hauteur

Contexte

La filière bois construction en France a connu ces dernières années une transformation en profondeur et une évolution de son positionnement. Elle a su s'affirmer comme une solution industriellement performante en s'appuyant sur les leviers de l'innovation et de la création de valeur par le développement de produits d'ingénierie bois. Il s'agit notamment mais pas exclusivement de l'avènement des panneaux en bois massifs contrecollés. Les multiples projets utilisant massivement le bois sont là pour témoigner de cette dynamique et de cette pertinence économique. Le bois n'est plus dès lors le matériau réservé à des projets confidentiels ou militants, mais bien une solution viable industriellement et économiquement, qui peut contribuer à la limitation du dérèglement climatique. Il lui faut pour cela s'inscrire pleinement dans un secteur de la construction en mutation porté par la révolution numérique, l'évolution du marché du bâtiment, dont la rénovation constitue le moteur, et l'exigence de résultats vis-à-vis de l'acte de construire ou de rénover.

En 2013, le Ministère du Redressement Productif, sous le pilotage du Ministre Arnaud Montebourg de l'époque, a lancé 34 plans de reconquête de la Nouvelle France Industrielle. Un de ces plans prévoyait la construction de bâtiments de grande hauteur de type R+10 à R+15 afin de tirer l'ensemble de la filière vers le « haut ».

S'en est suivie la création de l'association ADIVBOIS à la fin de l'année 2014 qui porte depuis le projet d'immeubles de grande hauteur, aménagés et agencés en bois. Ce projet financé par le deuxième Programme des Investissements d'Avenir (PIA2) s'inscrit dans la solution « Ville Durable ». L'association ADIVBOIS a été constituée alors que dans le même temps, la publication 2015 de la 3ème édition de l'observatoire de la construction bois soutenu par France Bois Forêt et le CODIFAB rappelait les difficultés économiques auxquelles sont confrontées les acteurs de la filière bois construction. Le bois construction a réussi à convaincre les donneurs d'ordre depuis le début des années 2000 avec des parts de marché qui augmentent. Toutefois l'évolution des mises en chantier construction bois entre 2012 et 2014 est en berne et dans le même temps, la part totale du stock de logements collectifs construits en bois s'effondre.

La baisse prononcée du secteur et les parts de marchés encore limitées sur le secteur du logement collectif donne encore plus de sens à l'action aujourd'hui menée par ADIVBOIS. La densification urbaine par les bâtiments de grande hauteur de type R+10 présente un potentiel de développement et donc de relance de l'activité industrielle de la filière bois. Cet effet de levier doit permettre de préparer le rebond économique attendu et le développement du secteur. Le bois doit explorer de nouvelles pistes de développement. L'objectif affiché d'ADIVBOIS est de faire réaliser et d'accompagner le développement des immeubles à vivre bois de grande hauteur. Cet objectifs et les actions portées par ADIVBOIS, sous-jacentes à l'atteinte de ces objectifs, doivent permettre d'expérimenter, capitaliser, convaincre et donner

envie, permettre la montée en compétences des professionnels du bâtiment et développer un écosystème de la construction bois.

Il s'agit de construire et préparer les référentiels techniques de demain en s'appuyant sur l'innovation pour positionner les solutions constructives bois sur des ouvrages aujourd'hui encore peu visés par les acteurs et ainsi sécuriser/fiabiliser la construction bois en hauteur. Cette dynamique ici décrite à l'échelle nationale trouve beaucoup de similitudes sur le plan international. Le CSTB, dans ce contexte, accompagne la filière bois au côté de l'association ADIVBOIS tant sur des sujets de recherche amont, que sur des sujets très opérationnels d'appui auprès des pouvoirs publics et auprès des organisations professionnelles de la filière dans la levée de freins techniques, jusqu'à la reconnaissance de l'innovation par l'évaluation.

Résumé de l'intervention

Dans un contexte fortement marqué par les enjeux du dérèglement climatique, nous nous intéressons ici à la perspective portée par nos sociétés modernes de proposer un nouveau modèle de construction durable. Ce modèle, pourrait en partie reposer sur l'idée de construire des bâtiments en bois de grande hauteur. Il s'appuierait sur une dynamique portée par un ensemble d'acteurs concourant collectivement à la construction d'une vision ou d'un imaginaire définissant les contours de nos villes de demain. Pour autant, cette dynamique relève-t-elle de la seule représentation d'un idéal porté par quelques-uns ou bien peut-on considérer que la construction bois de grande hauteur représente un phénomène existant effectivement et donc une réponse concrète aux enjeux du dérèglement climatique ?

A cette question, nous tentons ici d'apporter quelques éléments de réponse ou tout du moins de réflexion.

Nous revenons en particuliers sur l'actualité nationale et internationale et démontrons par le retour d'expérience que la construction bois de grande hauteur s'inscrit effectivement dans une forme de réalité.

Nous montrons par ailleurs que cette réalité s'appuie sur l'acquisition de savoir techniques et scientifiques renouvelés touchant des domaines multidisciplinaires aussi variés que la mécanique des structures, les sciences du feu et de l'acoustique, l'énergie et l'environnement, la physique du bâtiment, la durabilité mais aussi la gestion de la ressource, la préfabrication ou la construction hors-site, les méthodes chantier et les outils de maintenance en exploitation de ces ouvrages.

Il vous sera alors possible de vous forger votre propre opinion sur le sujet et de répondre à la question suivante : la construction bois de grande hauteur, une réalité tangible ou bien une légende urbaine ?

SESSIONS POSTERS

POSTERS PRIMES

Les prix des meilleurs posters ont été remis par Sylvain Mathieu, vice-président du conseil régional Bourgogne Franch-Comté en charge de la filière bois, de la forêt, de la montagne et des parcs et président du Parc naturel régional du Morvan.

Critères : qualité du fond scientifique, qualité de la forme et du message visuel, qualité et originalité du flash talk, …

Evaluation : par les participants avec un vote en ligne.

Session A

Premier prix : Rostom Leila, Navier, Champs sur Marne. Étude de l'effet d'un traitement thermique modéré sur l'hygroscopicité du bois par relaxométrie RMN du proton – **A16**

Second prix : Muytjens Lionel, GxABT, Liège. Réseaux de collaboration et valorisation des ressources locales en bois dans le secteur de la construction : évaluation du potentiel de développement de la filière bois wallonne par les proximités – **A15**

Session B

Premier prix : Roussey Claire, LGPM, Paris. Étude expérimentale du transfert de liquide dans le bois de chêne de tonnellerie par imagerie à rayons X – **B12**

Second prix : Frances Manon, Iprem, Pau. Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale – **B3**

Session C

Premier prix : Taieb Juliette, ArScAn, Paris. Analyse dendrochronologique des carottes d'épicéas modernes de la collection de J.-L. Giddings : apports pour la datation et la dendro-provenance des bois archéologiques alaskiens – **C11**

Second prix exæquo : Riparbelli Lorenzo, Gesaaf, Florence. Mona Lisa's digital twin : identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modelling – **C19**

Second prix exæquo : Zhang Xi, GC2D, Egletons. Effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de propagation des ondes ultrasonores Effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de propagation des ondes ultrasonores – **C3**

Session D

Premier prix : Munir Muhammad Tanvee, ESB, Nantes. Direct DRAQ5 DNA staining on sterilized and contaminated wood surface, investigation by confocal microscopy – **D17**

Second prix exæquo : Dougabka Dao, Biowooeb, Montpellier. Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides tchadiennes – **D11**

Second prix exæquo : Benistand Thibault, Lermab, Epinal. Caractérisation des assemblages réalisés en bois feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5 – **D1**

LISTE DES POSTERS PRESENTES DANS LES 4 SESSIONS

Sont présentés ici les résumés pour les sessions « posters », avec l'accord de cette diffusion et sous la responsabilité pour le contenu du présentateur et des co-auteurs.

Les résumés des posters sont classés selon l'ordre de passage dans les quatre sessions de flash-talk A, B, C et D. Les présentateurs sont soulignés. Dans ce qui suit, un sommaire avec les numéros de pages est présent au début de chaque chapitre corrrespondant à une session.

No	Laboratoire; ville (pays)	auteurs	titre
		Session A	
A1	CRC; Champs-s-M	Maurin Emmanuel, Trouy Marie-Christine, George Patrick	Projet d'ouvrage sur l'identification macroscopique des bois Apport à la connaissance des oeuvres du patrimoine
A2	I2M; Bordeaux	Hamdi Seif Eddine, Sbartaï Zoubir-Mehdi, Elachachi Sidi Mohammed	Analyse comparative de la modélisation numérique et la caractérisation expérimentale par analyse modale d'un élément de structure en bois
A3	I2M; Bordeaux	Perez Cedric, Chaplain Myriam, Morel Stephane, Coureau Jean-Luc	Comportement différé à la fissuration d'éléments de structures en bois sous chargements mécanique et environnement variables
A4	LCPO; Bordeaux	Mehats Jérémy, Castets Laurent, Grau Etienne, Grelier Stéphane	Homogénéisation de la couleur du bois de Pin Maritime
A6	ICA; Toulouse	Guélou Romain, Eyma Florent, Cantarel Arthur, Castanié Bruno, Bouvet Christophe, Susainathan John	Développement et caractérisation d'éco-structures composites
A7	ICA; Toulouse	Uwizeyimana Placide, Eyma Florent, Perrin Marianne	Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs
A8	ESB; Nantes	Amouzou Kodzo Vioto, Lanata Francesca, Loukili Ahmed	Évaluation du comportement dynamique des planchers mixtes bois-béton : Corrélation entre confort des usagers et modèles de dimensionnement
A9	UFPR; Curitiba (BR)	Trianoski Rosilani, Irle Mark, Richard Tristan, Michaud Franck, Belloncle Christophe, Iwakiri Setsuo	Potentiel du bois de Cordia trichotoma pour la réalisation de panneau lamellé-collé sur chant ou Edge Glued Panel (EGP) : étude préliminaire
A10	ESB; Nantes	Benas Yohann, Boutet Louis, Galliou Mathieu, Michaud Franck	Caractérisation de la flexibilité et de la résistance à la fatigue d'un treillis charnière bois
A11	ESB; Nantes	Ribas Leão Amanda, Buchner Julia, Irle Mark	Correlation between colour change and moisture content of naturally weathered wood surfaces
A12	ESB; Nantes	Boudaud Clément, Kaci Lila, Briot Sebastien, Martinet Phlippe	Modélisation élastique de robots en bois : adaptation de la théorie des poutres
A13	ESB; Nantes	Velez Guillermo, Irle Mark, Belloncle Christophe, Lahaye Marc, Estelle Bonnin	MDF waste: A feedstock for small sized-biorefineries?
A14	ESB; Nantes	Blanchard Philippe, Cheour-Eon Manel	Conception et expérimentation d'un programme d'innovation collaborative pour les industries de la filière bois.

A15	GxABT; Gembloux (BE)	Muytjens Lionel, Jourez Benoît, Maréchal Kévin	Réseaux de collaboration et valorisation des ressources locales en bois dans le secteur de la construction : évaluation du potentiel de développement de la filière bois wallonne par les proximités
A16	Navier; Champs-s-M	Rostom Leila, Caré Sabine, Courtier-Murias Denis, Rodts Stéphane	Etude de l'effet d'un traitement thermique modéré sur l'hygroscopicité du bois par relaxométrie RMN du proton
A17	Navier; Champs-s-M	Nguyen Dang Mao, Caré Sabine, Courtier-Murias Denis, Coussot Philippe	Mechanisms of liquid transport in softwood inferred from Magnetic Resonance Imaging
A18	FCBA; Bordeaux	Ouali Oussemah, Raphalen Elisabeth, Legay Stéphane, Budzinski Hélène, Le Menach Karyn,	Etude du comportement des biocides lors de vieillissements de bois traités en classe d'emploi 3 par des méthodes physico-chimiques d'analyse
A19	FCBA; Bordeaux	Sauvagere Julien, Rogaume Thomas, Richard Franck, Gaillard Jean-Marie	Développement d'une méthodologie expérimentale et numérique multi-échelles d'analyse de la propagation des feux de façade en bois
A20	FCBA; Champs-s-M	Chen Zhou, Pled Florent, Chevalier Luc, Launay Eric	Caractérisation expérimentale et simulation stochastique du comportement des meubles à base de panneaux de particules
A21	IRDL; Brest	Moutembe Bienvenu, Diakhate Malick, Moutou Pitti Rostand	Contribution à l'identification des signatures acoustiques des différents mécanismes de fissuration dans le bois
A22	IRDL; Brest	Nsouami Valérie, Manfoumbi Nicaise, Bastidas-Arteaga Emilio, Moutou Pitti Rostand, Diakhate Malick	Variabilité spatiale des contraintes et modules en compression pour des poutres de bois de Moabi du Gabon
Session B			
B1	Iprem; Pau	Bikoro Bi Athomo Arsène, Eyma Florent, Safou-Tchiama Rodrigue, Charrier Bertrand	Valorisation de coproduits de la transformation industrielle de l'Acajou (K. Ivorensis A. Chev)
B2	Iprem; Pau	Engozogho-Anris Starlin Peguy, Safou-Tchiama Rodrigue, Denaud Louis, Vidal Marcia, Charrier Bertrand	Etude du comportement thermique des tanins d'aubier du bois d'okoumé
B3	Iprem; Pau	Frances Manon, Charrier Bertrand	Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale
B4	Iprem; Pau	Issaoui Hamed, Lafaille Julie, Charrier-El Bouhtoury Fatima	Elimination des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par adsorption sur des mousses bio-sourcées à base de tanins et de lignines
B5	LMGC; Montpellier	Brémaud Iris, Langbour Patrick	PALISSANDRES ? Comprendre les liens botanique-chimie-mécanique-usages ayant déterminé le statut mondial de « bois précieux » du genre pantropical menacé Dalbergia
B6	LMGC; Montpellier	Burgers Agnès, Montero Cédric, Arnould Olivier, Brancheriau Loic, Vinches Marc, Marchal Rémy	Modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois pour la conception mécanique

B7	LMGC; Montpellier	Hu Hsien-Tsung, Cabrolier Pierre, Alkadri Ahmad, Carlier Capucine, Gril Joseph, Langbour Patrick, Brémaud Iris	Beyond « clear wood » : exploring the structure-properties of figured woods and of woods with strong gradients selected in craftsmanship
B8	LMGC; Montpellier	Alkadri Ahmad, Jullien Delphine, Arnould Olivier, Dyakonova Nina, Coquillat Dominique, Gril Joseph	Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent
B9	LMGC; Montpellier	Bardet Sandrine, Caré Sabine, Montero Cédric, Courtier-Murias Denis	Présentation d'un projet PEPS CNRS : GREENWOOD
B10	LMGC; Montpellier	Dupleix Anna, Mui Shu Wah, Jullien Delphine, Moity-Maïzi Pascale, Milliet-Treboux Pauline, Schatz Bertrand, Reutenauer Victor, Pfister François, Carlier Capucine	Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites
B12	LGPM; Paris	Roussey Claire, Colin Julien, Teissier Du Cros Rémi, Casalinho Joel, Perré Patrick	Étude expérimentale du transfert de liquide dans le bois de chêne de tonnellerie par imagerie à rayons X
B13	CINaM; Marseille	Normand Aubin, Farahi Rubye, Davison Brian, Passian Ali, Charrier Anne, Lereu Aude	Nanometrology of Populus plant cell walls: Toward plant morphogenesis under abiotic stress
B14	LESSEM; Grenoble	Cros Vivien, Bourrier Franck, Barré Jean-Baptiste, Berger Frédéric	Diagnostic mécanique par mesures vibratoires à l'échelle de l'arbre de l'efficacité et de la pérennité de la fonction de protection des forêts
B16	I2M; Bordeaux	Le Barbenchon Louise, Girardot Jérémie, Kopp Jean-Benoit, Viot Philippe	Caractérisation 3D multi-échelle de la structure du liège aggloméré
B17	LabECAM; Lyon	Alteyrac Jérôme, Denaud Louis, Viguier Joffrey	Propriétés des fissures lors du déroulage du hêtre en fonction de la température et de la pression
B18	LabECAM; Lyon	Vidal Marcia, Denaud Louis, Viguier Joffrey, Charrier Bertrand	Les conséquences du procédé de fabrication sur les propriétés des panneaux contreplaqués
B19	Labomap; Cluny	Curti Rémi, Goli Giacomo, Marcon Bertrand, Cottin Fabrice, Collet Robert, Furferi Rocco	Influence de l'anisotropie lors du fraisage de produits d'ingénierie bois
B20	Labomap; Cluny	Besseau Benoît, Butaud Jean-Claude, Collet Robert, Letourneau Roger, Muzy Loïc, Pot Guillaume	Etude de la production de carrelets de menuiseries en LVL chêne des chênes de qualité secondaire issus de la ressource locale
B21	Labomap; Cluny	Viguier Joffrey, Marcon Bertrand, Butaud Jean-Claude, Roux Benjamin, Girardon Stéphane, Denaud Louis	Etude expérimentale par corrélation d'images des propriétés de cisaillement de voile de panneaux de contreplaqués en hêtre
B22	Labomap; Cluny	Frayssinhes Rémy, Girardon Stéphane, Collet Robert, Denaud Louis, Cottin Fabrice	Optimisation du temps de chauffe de billons en vue de leur déroulage

Session C			
C1	GC2D; Egletons	Hafsa Waël, Angellier Nicolas, Takarli Mokhfi, Pop Ion-Octavian	Vers la qualification in-situ de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive
C2	GC2D; Egletons	Pham Minh Dung, Ulmet Laurent, Nguyen Tuan Anh, Angellier Nicolas, Dubois Frédéric	Optimisation Numérique de la Détermination de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques
C3	GC2D; Egletons	Zhang Xi, Takarli Mokhfi, Sauvat Nicolas, Dubois Frédéric, Sbartaï Zoubir Mehdi, Courreges Fabien	Effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de propagation des ondes ultrasonores
C4	Lermab; Vandoeuvre	Chapuis Hubert, Basso Cécilia, Pizzi Antonio, Gérardin-Charbonnier Christine	Conception de mousses de tannins à hydrophobie modulée
C5	Lermab; Epinal	Mabicka Iwangou Saint Bickolard, Besserer Arnaud, Gerardin Philippe, Safou Tchiama Rodrigue, Andzi Barhe Timoleon	influence de la pollution sur les propriétés du bois de la mangrove jouant un rôle de phytorémédion: Cas pratiques de Rhizophora racemosa et Avicennia nitida
C6	Lermab; Vandoeuvre	Bédounguindzi Walter Fiacre, Candelier Kévin, Edou Engonga Prosper, Dumarcay Stéphane, Thévenon Marie-France, Gérardin Philippe	Caractérisations chimiques et activités antitermites des fractions volatiles (huile essentielle et résine brute) et lourde (résine purifiée) de Canarium schweinfurthii (Aiélé) du Gabon.
C7	Lermab; Vandoeuvre	Bopenga-Bopenga Christ Stone Arnaud, Dumarçay Stéphane, Edou Engonga Prosper, Gérardin Philippe	Criblage phytochimique, activité antifongique des composés extractibles du noisetier du Gabon vis-à-vis des champignons basidiomycètes Poria placenta, Coniophora puteana, Gloephylum trabeum
C8	Lermab; Vandoeuvre	Chepkwony Sarah, Durmacay Stéphane, Chapuis Hubert, Kiprop Ambrose, Gérardin Philippe, Gérardin Christine	Identification of phenolic compounds in Prosopis juliflora by liquid chromatography - electrospray ionization mass spectrometry
C9	Lermab; Vandoeuvre	Verove Clémentine, Chapuis Hubert, Gérardin-Charbonnier Christine	Valorisation des pentoses issus du hêtre : nouveaux composés amphiphiles tensio-actifs et/ou gélifiants à base de xylose
C10	Lermab; Vandoeuvre	Zang-Ondo Cherryl-Mirabelle, Chapuis Hubert, Gérardin-Charbonnier Christine	Gélifiants trimodulaires biosourcés : synthèse et caractérisations
C11	ArScAn; Paris	Taieb Juliette, Alix Claire, Juday Glenn P., Elliot Michelle, Petit Christophe	Analyse dendrochronologique des carottes d'épicéas modernes de la collection de J.-L. Giddings : apports pour la datation et la dendro-provenance des bois archéologiques alaskiens
C12	LTDS; St-Etienne	Béreyziat Antoine, Audebert Maxime, Durif Sébastien	Analyse numérique du comportement thermique de poutres hybrides bois-acier en situation d'incendie
C13	Pascal; Clermont-Fd	Mambili-Lebongui Germice Jordy, Moutou-Pitti Rostand, Badel Eric, Gril Joseph, Toussaint Evelyne	Sur la fissuration du bois vert par modélisation numérique et microtomographie à rayons X
C14	Pascal; Clermont-Fd	Engonga-Edzang Arnauld Clauvy's, Pambou-Nziengui Claude Feldman, Moutou-Pitti Rostand	Etude comparative du comportement hydromécanique en compression cyclique de trois essences tropicales
C15	MSB; Libreville (GA)	Ndong-Bidzo Cédric Horphé, Moutou-Pitti Rostand, Ikogou Samuel, Beat Kaiser	Caractérisation mécanique in situ de quelques essences tropicales pour la réalisation de poutres en BMR.

C16	IRT; Libreville (GA)	Oum Joseph-Bertrand, Ekomy-Ango Serge, Moutou-Pitti Rostand	Conception et fabrication d'une brique adobe à base de l'argile et de la sciure de bois
C17	Pascal; Clermont-Fd	Asseko-Ella Martian, Pambou-Nziengui Claude-Feldman, Moutou-Pitti Rostand, Godi Gael, Gril Joseph, Fournely Eric	Mise en evidence de l'impact des variations climatiques sur la durée de vie d'une structure en bois:étude expérimentale
C18	Piaf; Clermont-Fd	Niez Benjamin, Dlouha Jana, Toussaint Evelyne, Gril Joseph, Moulia Bruno, Badel Eric	Mechanical properties of "flexure wood"
C19	Gesaaf; Florence (IT)	Riparbelli Lorenzo, Dionisi-Vici Paolo, Dupré Jean-Christophe, Goli Giacomo, Jullien Delphine, Brémand Fabrice, Mazzanti Paola, Hesser Franck, Marcon Bertrand, Togni Marco, Gauvin Cécilia, Valle Valery, Cocchi Linda, Mandron Patrick, Ravaud Elisabeth, Uzielli Luca, Gril Joseph	Mona Lisa's digital twin: identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modeling
Session D			
D1	Lermab; Epinal	Benistand Thibault, Bléron Laurent, Bocquet Jean-François	Caractérisation des assemblages réalisés en bois feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5
D2	Lermab; Vandoeuvre	Ngwa-Obame Sébastien, Safou-Tchiama Rodrigue, Devin-Ziegler Isabelle, Brosse Nicolas	Optimisation de l'extraction et caractérisation de la lignine du bois d'Okoumé par le procédé de l'explosion à la vapeur
D3	Lermab; Epinal	Lemaître Romain, Bocquet Jean-François, Bader Thomas, Schweigler Michael	Le modèle de poutre sur fondation comme méthode alternative au dimensionnement des assemblages bois de type tiges
D4	Agap; Piracicaba (BR)	Chaix Gilles, Pires-Franco Mariana, Tomazello-Filho Mario, Chambi-Legoas Roger, Gorretta Nathalie, Pasquini Celio, Vidal Cristiana, Roger Jean-Michel	Imagerie hyperspectrale et chimie du bois ? qualité du bois et contraintes de croissance (hydrique et minérale)
D5	Agap; Antananarivo (MG)	Razafimahatratra Andriambelo-Radonirina, Razafinarivo Ravo-Nantenaina-Gabriella, Rakotovololonalimanana Herizo, Rajemison Andraina, Thévenon Marie-France, Belloncle Christophe, Chaix Gilles, Ramananantoandro Tahiana	Durabilité naturelle : comparaison des essais en laboratoire et des essais au champ basés sur des espèces de bois de Madagascar
D6	Agap; Antananarivo (MG)	Razafinarivo Ravo-Nantenaina-Gabriella, Razafimahatratra Andriambelo-Radonirina, Tomazello-Filho Mario, Chaix Gilles, Razakamanarivo Herintsitohaina, Ramananantoandro Tahiana	Développer la connaissance des propriétés de bois des essences autochtones de Madagascar vers une utilisation durable des ressources locales
D7	ESSA; Tananarive (MG)	Raobelina Andry Clarel, Razafimahatratra Andriambelo Radonirina, Chaix Gilles, Ravaomanalina Bako Harisoa, Ramananantoandro Tahiana	Potentialités de la spectroscopie proche infrarouge comme aide à l'identification des bois de l'Annexe II de la CITES : cas de quatre espèces de Dalbergia de Madagascar
D8	Biowooeb; Montpellier	Amadji Togbé-Armel, Adjovi Edmond Codjo, Gérard Jean	Etude De La Transformation De Produits Connexes De Bois Et Plastiques/Polystyrène Expansé En Matériaux Sandwich Autoadhésifs

D9	Biowooeb; Montpellier	Boer Febrina-Dellarose, Commandré Jean-Michel, Thévenon Marie-France, Fournier Mériem	Valorization of pyrolysis by-products for the protection of biomaterials
D10	Biowooeb; Montpellier	De Freitas Homen De Feria Bruno, Rousset Patrick, De Cassia Oliviera Carneiro Angélica, Caldeira-Pires Armando, Candelier Kévin	Impact of torrefaction processes on brazilian biomasses storage
D11	Biowooeb; Montpellier	Dougabka Dao, Gérard Jean, Guibal Daniel, Ttikri Bianzeubé	Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides tchadiennes
D12	Biowooeb; Montpellier	Ouaar Djilali, Megherbi-Benali Aicha, Gérard Jean, Toumi-Benali Fawzia	Activité antibactérienne de l'huile essentielle extraite de la sciure de bois de Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus.
D13	Silva; Nancy	Pichancourt Jean-Baptiste, Caurla Sylvain, Colin Antoine, Cuny Henri, Fortin Mathieu, Colin Francis	Extraforest : conception d'un outil d'aide à la décision pour rapprocher la chimie et les filières forêt-bois en régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté
D14	Silva; Nancy	Purba Citra-Yanto-Ciki, Ruelle Julien, Fournier Mériem	Radial variation of wood properties on hardwood recovered from thinning
D15	Silva; Nancy	Arnould Maxence, Morel Laure, Fournier Mériem	Conception et évaluation de systèmes d'innovation pour mieux mobiliser les bois en petite propriété forestière privée
D16	ESB; Nantes	Buchner Julia, Irle Mark, Belloncle Christophe, Michaud Franck, Macchioni Nicola	Surface characterisation of untreated wood surfaces after artificial and natural weathering
D17	ESB; Nantes	Munir Muhammad Tanveer, Oumarou Mahamane Ismaël, Dubreil Laurence, Federighi Michel, Aviat Florence, Pailhor ies Hélène, Eveillard Matthieu, Belloncle Christophe	Direct DRAQ5 DNA staining on sterilized and contaminated wood surface, investigation by confocal microscopy
D18	ESB; Nantes	Chumak Ksenia, Brunet Louis-Patrick, Konovalov Andre, Lefebvre Cédric, Michaud Franck	Etude de faisabilité d'un système d'attache résiliente en bois
D19	Pascal; Clermont-Fd	Fournely Eric, Quistin Paul, Bargy Jean-Mikhaël, Gril Joseph, Godi Gaël, Cador Luc, Lamadon Thierry, Romana Laurence	Les structures bois dans l'environnement Guadeloupéen, projet Bois Duramhen 971
D20	Anco; Guadeloupe	Quistin Paul, Bourgade Oriel, Fournely Eric, Pipet Jean Baptiste, Gril Joseph, Godi Gaël, Cador Luc, Lamadon Thierry, Romana Laurence	Les Structures bois dans l'environnement Martiniquais, projet Bois Duramhen 972

Session Poster A

A01 : Projet d'ouvrage sur l'identification macroscopique des bois Apport à la connaissance des œuvres du patrimoine, Maurin Emmanuel et al. 44

A02 : Analyse comparative de la modélisation numérique et la caractérisation expérimentale par analyse modale d'un élément de structure en bois, Hamdi Seif Eddine et al. 49

A03 : Comportement différé à la fissuration d'éléments de structures en bois sous chargements mécanique et environnement variables, Cédric Perez et al. 52

A04 : Homogénéisation de la couleur du bois de Pin Maritime, Mehats Jérémy et al. 56

A06 : Développement et caractérisation d'éco-structures composites, Guélou Romain et al. 59

A07 : Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs, Uwizeyimana Placide et al. 63

A08 : Évaluation du comportement dynamique des planchers mixtes bois-béton : Corrélation entre confort des usagers et modèles de dimensionnement, Amouzou Kodzo Vioto 65

A09 : Potentiel du bois de Cordia trichotoma pour la réalisation de panneau lamellé-collé sur chant ou Edge Glued Panel (EGP) : étude préliminaire, Belloncle Christophe et al. 68

A10 : Caractérisation de la flexibilité et de la résistance à la fatigue d'un treillis charnière bois, Galliou Mathieu et al. 72

A11 : Correlation between colour change and moisture content of naturally weathered wood surfaces, Ribas Leão Amanda 76

A12 : Modélisation élastique de robots en bois : adaptation de la théorie des poutres, Boudaud Clément et al. 79

A13 : MDF waste: A feedstock for small sized-biorefineries?, Velez Guillermo et al. 81

A14 : Conception et expérimentation d'un programme d'innovation collaborative pour les industries de la filière bois., Blanchard Philippe 84

A15 : Réseaux de collaboration et valorisation des ressources locales en bois dans le secteur de la construction : évaluation du potentiel de développement de la filière bois wallonne par les proximités, Muytjens Lionel 88

A16 : Etude de l'effet d'un traitement thermique modéré sur l'hygroscopicité du bois par relaxométrie RMN du proton, Rostom Leila et al. 92

A17 : Mechanisms of liquid transport in softwood inferred from Magnetic Resonance Imaging, Nguyen Dang Mao 96

A18 : Etude du comportement des biocides lors de vieillissements de bois traités en classe d'emploi 3 par des méthodes physico-chimiques d'analyse, Ouali Oussemah et al. 100

A19 : Développement d'une méthodologie expérimentale et numérique multi-échelles d'analyse de la propagation des feux de façade en bois, Sauvagere Julien 103

A20 : Caractérisation expérimentale et simulation stochastique du comportement des meubles à base de panneaux de particules, Chen Zhou et al. 106

A21 : Contribution à l'identification des signatures acoustiques des différents mécanismes de fissuration dans le bois, Moutembe Bienvenu et al. 110

A22 : Variabilité spatiale des contraintes et modules en compression pour des poutres de bois de Moabi du Gabon, Nsouami Valérie et al. 112

Poster A01

Projet d'ouvrage sur l'identification macroscopique des bois Apport à la connaissance des œuvres du patrimoine

MAURIN Emmanuel[1], TROUY Marie-Christine[2], GEORGE Patrick[3]

[1]Laboratoire de recherche des monuments historique
[2]Laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois
[3]Expert indépendant
emmanuel.maurin@culture.gouv.fr

Mots clefs : bois ; identification ; macroscopie ; patrimoine

Identifier les bois des objets du patrimoine, pourquoi faire ?

Les objets du patrimoine font l'objet d'une surveillance particulière par des personnes compétentes en conservation-restauration. « Cette discipline regroupe des interventions spécifiques de sauvegarde d'un objet ou d'un monument dans le respect de sa signification à la fois culturelle, historique, esthétique, éthique et artistique. L'objectif d'une intervention de conservation-restauration n'est pas de remettre les biens culturels « à neuf », mais bien de prolonger leur durée de vie dans ce qu'ils représentent comme liens entre les époques et les générations » (extrait du site de la Fédération française des conservateurs-restaurateurs).

Dans ce cadre, l'identification des bois est une information importante à connaitre en conservation-restauration pour plusieurs raisons :

- elle est déterminante à la connaissance de l'œuvre (historique et esthétique) ;
- la nature du bois peut nécessiter un traitement biocide ;
- les directives Cites de la convention de Washington (Cites 1) interdisent la circulation de certains bois (les palissandres en particulier) ;
- l'identification fait partie des outils qui permettent l'authentification d'un meuble ou d'un objet.

(a)

(b)

Fig. 1 : Château de Condé sur l'Escault, chambre du Duc (a) et détail du motif central (b) ; l'objectif était de cartographier les différents bois utilisés dans cette pièce ; il est impossible d'effectuer un prélèvement.

Pour l'identification des bois, les scientifiques utilisent des méthodes bien connues : des coupes microtomiques sont effectuées sur le bois à identifier. A partir de l'observation sous

microscope de ces coupes, des critères anatomiques sont relevés et comparés à ceux observés sur des bois référencés dans des bases de données (type Inside wood). Les problèmes que pose ce type de pratique dans le domaine patrimonial, sont :

- l'impossibilité fréquente de réaliser un prélèvement (figure 1),
- le temps nécessaire à la réponse.

Lors de différentes expériences, l'expertise macroscopique a été confrontée à l'expertise microscopique. Il en ressort que :

- l'expertise macroscopique n'a pas été mise en défaut ;
- elle va même parfois plus loin que l'expertise au microscope (par exemple pour les bois de la famille des Rosacées dits « de fruitiers »);
- elle est beaucoup plus rapide.

Cependant, l'expert en reconnaissance macroscopique, fort de son expérience et sa mémoire photographique, ne justifie pas toujours son expertise. Il n'est pas toujours en mesure de donner des critères objectifs d'identification utilisables par d'autres.

Par ailleurs, si les bois utilisés dans le patrimoine ont fait l'objet d'un ouvrage de référence (Viaux-Loquin, 1997), il n'existe pas d'ouvrage scientifique abordant l'identification macroscopique de ces bois, faisant appel à la fois à des connaissances anatomiques et techniques en complément des données historiques. De plus, les bois utilisés par les ébénistes, notamment sous forme de placages, peuvent présenter des qualités esthétiques singulières, par exemple des figurations, mises en valeur par différents modes de débit.

Plan éditorial de l'ouvrage

Il s'agit de proposer un outil d'expertise, qui s'appuie sur toutes les informations anatomiques et techniques collectées par une observation à l'échelle macroscopique -autrement dit à l'œil nu et à l'aide d'un simple compte-fil (grossissement maximal de 20) et qui intègre toutes les informations historiques sur le commerce et l'utilisation des bois utiles à l'identification.

Le plan envisagé est le suivant :

- une introduction pour apprendre à « lire » le bois : collecter des informations sur l'anatomie du bois à identifier, comprendre les figurations et les singularités
- une présentation des meubles sélectionnés (photo d'ensemble et données historiques)
- 100 fiches de bois comprenant chaque fois que possible :
  - des données techniques et historiques (commerce, période d'utilisation)
  - une description de l'anatomie à l'échelle macroscopique illustrée par des photos d'échantillons de références parfaitement orientés, à l'échelle x10
  - des photos de détails de meubles

Illustration du projet : les « bois citron » ou « citrons » ou « citronniers »

Le bois du vrai **Citronnier** à fruits (*Citrus* spp.) n'a pas été utilisé en ébénisterie.

En référence à leur couleur jaune, deux bois ont été désignés sous les appellations « bois citron » ou « citrons » ou « citronniers » : le **Citron de Saint Domingue** ou **Espenille** (Zanthoxylum flavum) et le **Citron de Ceylan** (*Chloroxylon swietenia*). Ils appartiennent à la même famille que le vrai Citronnier, les Rutacées. Le **Pau Amarello** (*Euxylophora paraensis*)

est un autre bois jaune de la famille des Rutacées, au grain un peu plus grossier, qui a également été utilisé, en particulier pour des intérieurs de cabinet (Fig.2)

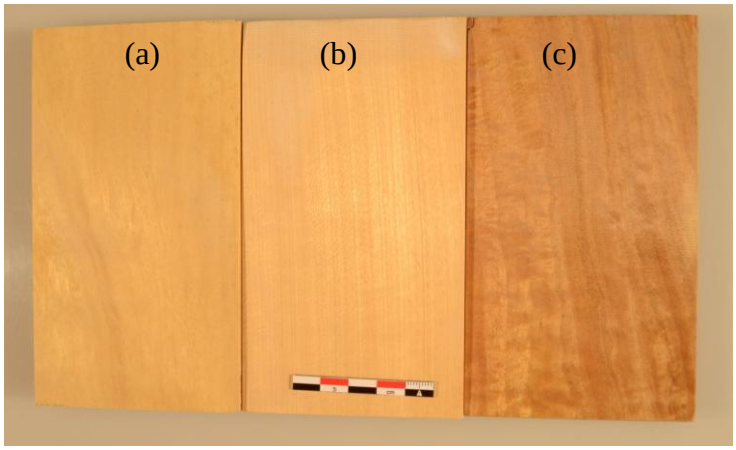


Fig. 2 : Vue de débits longitudinaux de trois bois « citron » ; (a) *Zanthoxylum flavum, (b) Euxylophora paraensis, (c) Chloroxylon swietenia*

Des données historiques sont utiles pour corroborer l'identification du bois sur la base de son observation. L'Espenille, par exemple, provenant de Porto Rico, Saint Domingue et Jamaïque, arriva en Europe dès le début du XVIII° et fut d'abord utilisé sur des meubles de port (Nantes, La Rochelle…), mélangé avec d'autres Bois des Îles. Chez les ébénistes parisiens, c'est Cressent qui semble être le premier à l'utiliser vers 1730, puis R.V.L.C., Carlin, Weisweiler, Molitor… Cette essence fut très à la mode durant la Restauration (1815-1830). Souvent utilisé pendant le XIX° siècle en marqueterie, il fut supplanté par le Citronnier de Ceylan à la fin du siècle.

La ronce d'Espénille fut beaucoup utilisée par les ébénistes anglais au XVIII° ; en France les plus beaux exemples se trouvent sur des meubles de Weisweiler.

Au Louvre, sur un ensemble Récamier (Fig 3), l'Espénille est associé à l'Amarante.

Fig. 3 : Ensemble Récamier - Jacob frères – 1798 ; Musée du Louvre - OA 11383-11391 ; « Placages de citronnier et amarante » ; vue d'un siège et du bouton de son accoudoir

Fig. 4 : Coupe transversale d'Espenille (*Zanthoxylum flavum)*

Un fauteuil de cet ensemble est photographié, ainsi que plusieurs détails dont un bouton d'accoudoir permettant d'observer la coupe transversale du bois (Fig 3.). Les photos de détail

sont mises en parallèle avec des photos réalisées sur un échantillon de référence parfaitement orienté (Fig.4).

Les coupes transversales d'Espénille montrent que les limites de cernes sont marquées par des lignes de parenchyme marginal et que les rayons sont aussi larges que les pores (Fig. 3 et 4)

Des coupes tangentielles photographiées sur le meuble et l'échantillon de référence d'Espénille permettent de montrer que le bois n'est pas étagé, contrairement au Citronnier de Ceylan.

Mise en œuvre du projet

Le projet repose sur une association de compétences :

- Patrick George, expert en identification macroscopique,
- Marie-Christine Trouy, maitre de conférence, Université de Lorraine, animatrice du MOOC « anatomie du bois »,
- Emmanuel Maurin, Ingénieur LRMH.

Ce projet est rendu possible par les Musées qui nous ouvrent leurs portes, en particulier le Musée des Arts Décoratifs et le Musée du Louvre. Nous avons prévu d'étendre nos investigations à des Musées de province, en particulier le Musée de l'Ecole de Nancy et le Musée Dauphinois à Grenoble.

Plusieurs missions d'études seront également effectuées au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) qui possède la plus grande xylothèque de France (et une des plus belle d'Europe avec celle d'Hambourg en Allemagne). Cette collaboration est incontournable pour préciser la description des bois de références et leurs appellations passées et actuelles.

Remerciements

Nous remercions Les éditions du Patrimoine qui ont adhéré à notre projet avec enthousiasme et y apportent le soutien et l'accompagnement nécessaires.

Références

Cites, https://cites.org/sites/default/files/fra/com/pc/24/com/F-PC24-Com-02.pdf,
« Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction ».

Viaux-Loquin J. (1997) « Les bois d'ébénisterie dans le mobilier français », Léonce Laget

MOOC « Anatomie du Bois », https://www.fun-mooc.fr/courses/course-v1:lorraine+30003+session03/about

Poster A02

Analyse comparative de la modélisation numérique et la caractérisation expérimentale par analyse modale d'un élément de structure en bois

HAMDI Seif Eddine[1], SBARTAI Zoubir Mehdi[1], ELACHACHI Sidi mohammed[1]

[1]Institut de Mécanique et Ingénierie, Université de Bordeaux
351 cours de la libération, 33405 Talence Cedex, France
seif-eddine.hamdi@u-bordeaux.fr

Mots clefs : analyse modale opérationnelle ; modélisation par éléments finis ; bois

Contexte et objectifs

Actuellement, dans le monde entier et particulièrement en Europe, l'industrie du génie civil manifeste un intérêt croissant pour les structures à base de bois. Les contextes économiques et environnementaux ont permis l'émergence de nouveaux marchés pour les constructions vertes jusqu'à présent confinées aux structures à base d'acier et de béton. L'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux à base de bois présenterait de nombreux avantages, notamment un coût moindre et un impact sur l'environnement (Nzieegui et al. 2017). Les avantages peuvent également inclure des économies d'énergie, le renouvellement des ressources, la réduction de la teneur en matières fossiles brutes et le recyclage. Cependant, les matériaux en bois présentent des inconvénients par rapport aux structures de génie civil classiques telles que l'acier et le béton : notamment une sensibilité aux variations thermiques et hydriques. Le potentiel des matériaux à base de bois n'a toujours pas été complètement exploité, car les relations entre les paramètres de rupture à l'échelle microscopique et le comportement à l'échelle macroscopique restent mal décrites ou intégrées.

L'étude de la réponse aux vibrations forcées permet l'évaluation dynamique du comportement structurel à l'aide de techniques d'analyse modale opérationnelle. Pintelon et al. (2004) ont proposé une méthode d'identification de système pour extraire un module d'élasticité dépendant de la fréquence d'un matériau homogène isotrope à partir d'expériences de vibration transversale et longitudinale forcé sur une poutre dans des conditions de frontière libre-libre. Larsson (1991) a utilisé la théorie des poutres pour déterminer le module de Young et le module de cisaillement des matériaux composites présentant un degré élevé d'anisotropie en mesurant les fréquences propres du matériau. Cette étude présente une analyse comparative de la modélisation numérique et la caractérisation expérimentale par analyse modale de poutrelles de pin maritime (Pinus pinaster). Les signaux acquis à l'aide d'accéléromètres sont comparés dans différentes plages de fréquences. La méthode exponentielle complexe des moindres carrés (LSCE) et la fréquence complexe des moindres carrés (LSCF) sont utilisées pour l'analyse des signaux acquis. Les paramètres dynamiques extraits (fréquences naturelles, formes de mode et amortissement) sont analysés pour l'extraction des propriétés mécaniques des poutrelles. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux fournis par un modèle d'éléments finis (MEF).

Matériaux et méthodes

La poutre en bois a été discrétisée en un nombre fini d'éléments pour le l'analyse modale. L'attention a été portée sur la sélection et l'orientation du transducteur de manière à ce qu'il ne soit pas monté sur un nœud d'un mode d'intérêt structurel ou à proximité de celui-ci. La condition de limite fixe-libre a été sélectionnée dans le modèle numérique sous Ansys. La

Fig.1 montre la configuration expérimentale. Une extrémité de la poutre a été fixée sur un support. Un marteau d'impact mobile est utilisé comme source d'excitation. Un capteur de force (Dytran, U.S.A) a été utilisé pour mesurer la force d'excitation afin d'obtenir les fonctions de réponse en fréquence (FRF). Pour obtenir les FRFs, un accéléromètre DJB (A / 123 / E) a été utilisé. Les données ont été acquises à l'aide d'un module d'aquisition NI-9234, avec une fréquence d'échantillonnage de 4056 Hz et une fenêtre Hanning. Les mesures de FRFs ont été effectuées à un nombre de degrés de liberté suffisamment important pour obtenir des formes de mode précises.

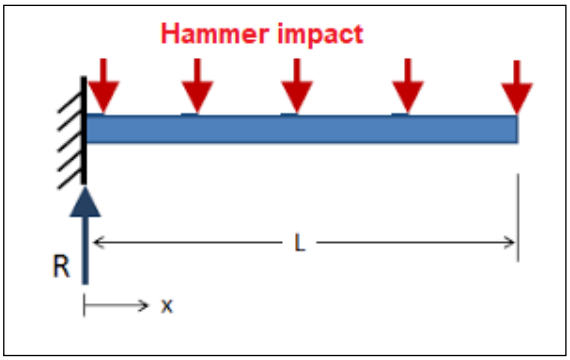


Fig. 1 : Schéma du dispositif experimentale

Les paramètres modaux ont été extraits des FRF en utilisant la méthode exponentielle du complexe des moindres carrés (LSCE) (Ewins 2003). L'équation de mouvement d'Euler pour la vibration transversale d'une poutre est donnée par Thomson (1998) :

$$\frac{d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2y}{dx^2}\right) - \rho\omega^2 y = 0$$

Le terme y est la vibration transversale de la poutre, x est la distance le long de la poutre à partir de l'extrémité fixe, E est le module de Young, I est le moment d'inertie de la section transversale autour de l'axe de la poutre et mass est la masse par unité de longueur de la poutre. Les fréquences naturelles de vibration peuvent être écrites comme suit :

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho l^4}}$$

β_n dépend des conditions aux limites du problème. Les valeurs de β_n pour les conditions aux limites libres fixes sont données dans la littérature (Thomson 1998). Ainsi, E a été calculé en connaissant tous les autres termes.

Résultats préliminaires

La Fig. 2 (a) montre les formes du mode analytique pour le faisceau rectangulaire simulé. La Fig. 2 (b) montre les formes expérimentales du mode normalisé pour la poutre en bois. Les résultats de l'analyse expérimentale et de l'analyse modale FE sont comparés et les ratios de module élastique et d'amortissement structurel sont obtenus par analyse modale expérimentale. Les Fig. 2 (a) et Fig. 2 (b) montrent une bonne corrélation entre l'expérience et l'analyse numérique.

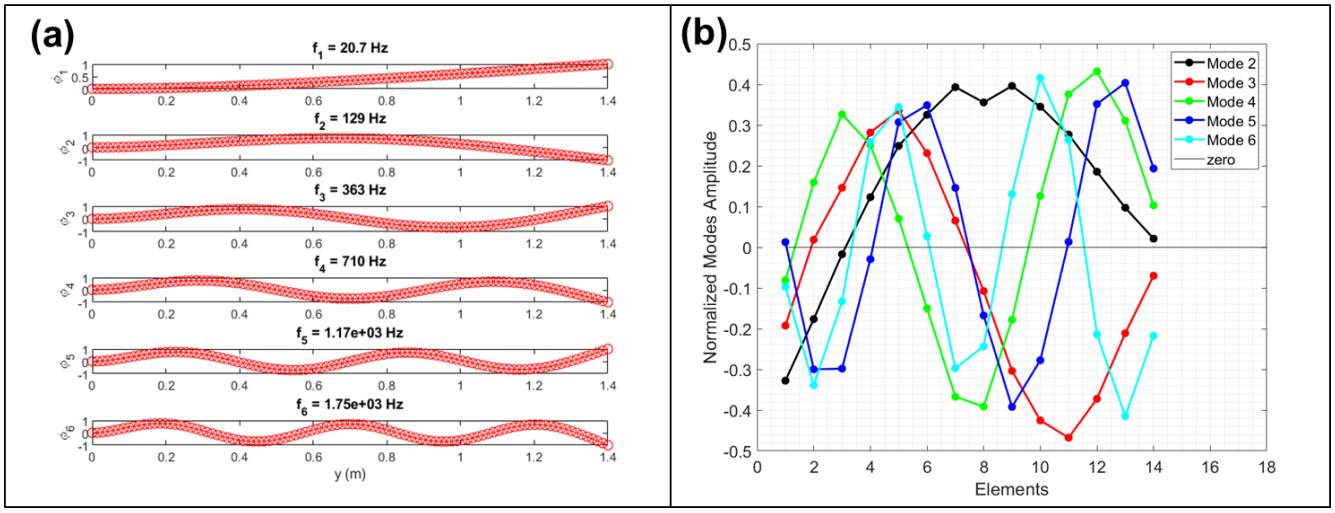


Fig. 2 : (a) Modes propores obtenues par modélisation numérique: modes 1 à 6; (b) Modes propores obtenues par analyse éxpérimentale : modes 2 à 6

Remerciements

Les auteurs souhaitent vivement remercier Région Aquitaine pour son soutien financier à ce travail dans le cadre du projet QUALIPIN.

Références

Ewins D. (2003) Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., England.

Larsson P. (1991) Determination of Young's and shear modulii from flexural vibrations of beams, Journal of Sound and Vibration, Vol. 146, N°1, pp 111-123

Nzieegui C., Ikogou S., Moutou Pitti R. (2017) Impact of cyclic compressive loading and moisture content on the mechanical behavior of Aucoumea Klaineana Pierre, Wood Material Science & Engineering, Vol. 5, N°1,1-7

Pintellon R., Guillaume P, Vanlanduit S., Belder K., Rolain Y. (2004) Identification of Young's modulus from broadband modal analysis experiments, International Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18,699-726.

Thomson W. (1998) Theory of Vibration with Application», Pearson Education, Inc.

Poster A03

Comportement différé à la fissuration d'éléments de structures en bois sous chargements mécanique et environnement variables

PEREZ Cédric[1], CHAPLAIN Myriam[1], MOREL Stéphane[1], COUREAU Jean-Luc[1]

[1]I2M CNRS UMR 5295, TALENCE
cedric.perez@u-bordeaux.fr

Mots clefs : Rupture ; Bois ; Teneur en eau ; mode mixte ; FPZ.

Contexte

Le bois est un matériau quasi-fragile pour lequel l'effet de l'hygrométrie sur le comportement à rupture est peu traité dans la littérature. Par ailleurs, le dimensionnement des structures bois basé sur l'Eurocode 5 considère uniquement le mode de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I) alors que bien souvent la rupture du bois se produit en mode mixte (mode I + mode II) comme par exemple dans le cas de poutres à épaulement ou présentant des singularités (Jockwer, 2015). Le bois est un matériau dont les propriétés mécaniques (élastiques, visqueuses, ruptures) sont fortement dépendantes de la teneur en eau et de la température (Husson, 2009). Afin d'étudier la tenue dans le temps d'une structure bois dans son environnement, il est donc essentiel de tenir compte des variations d'humidités relatives de l'air car ces variations climatiques peuvent provoquer une fissuration et une rupture prématurée des éléments structuraux présentant des singularités géométriques (Chaplain et Valentin, 2004 ; Phan, 2016). Afin de mieux comprendre le comportement de rupture des éléments structuraux bois, il est nécessaire d'étudier la rupture en mode mixte sous différentes teneurs en eau du bois. Des essais de propagation de fissure en mode I (ouverture) et mode II (cisaillement plan) ont donc été réalisés sur des éprouvettes de type « MMB » (mixed mode bending) de pin Maritime conditionnées à différentes teneurs en eau. Les réponses force-déplacement obtenues sont analysées sur la base de la Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture équivalente (MLEReq) (Morel, 2007) qui permet d'estimer les courbes de résistances à la propagation de fissure (courbe-R) pour différentes teneurs en eau.

Campagne expérimentale

Des essais de rupture de caractérisation sont réalisés en mode d'ouverture de fissure (mode I) et en mode de cisaillement plan (mode II) sur une même géométrie d'éprouvettes en pin Maritime (éprouvette DCB en mode I et ENF en mode II). Les deux types d'essais sont réalisés dans la configuration Tangentiel-Longitudinal (TL), i.e., conduisant à une propagation de fissure dans le plan Radial-Longitudinal (RL). Les éprouvettes sont conditionnées suivant 6 teneurs en eaux différentes allant de 5% à 27%. Les essais de mode I sont réalisés via un asservissement en déplacement à partir du déplacement d'ouverture mesuré à proximité du fond d'entaille initiale tandis que les essais de mode II sont asservis en déplacement à partir de la flèche du spécimen. La localisation des déplacements d'asservissement a été optimisée de manière à réduire les instabilités de fissure bien connues des essais DCB et ENF. Ainsi les vitesses de déplacement varient en cours d'essais et en fonction de la teneur eau du spécimen, mais chaque essai est réalisé dans un temps compris entre 180 s et 300 s (Fig. 1) ce qui permet de limiter l'influence de la viscosité. Des essais de durée de vie (fluage) sur des éprouvettes entaillées de taille semi-structurelle sont également effectués sous variation de l'humidité relative (HR) de l'air et à température constante (Fig. 2 et Fig. 3). La force à rupture (Fs) de chaque éprouvette testée sous HR variable et température

constante a été préalablement évaluée à partir d'un essai monotone réalisé sur une éprouvette jumelle.

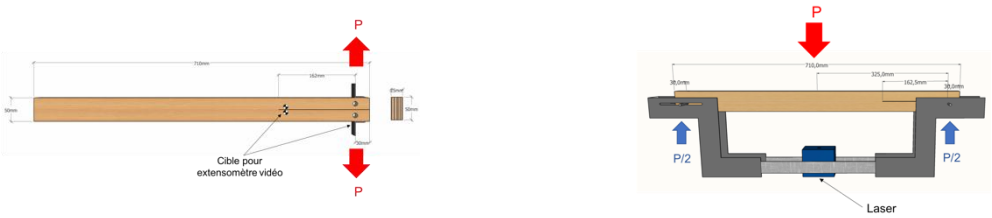


Fig. 1 : Schémas de l'essai de mode I (spécimen DCB) à gauche et de l'essai de mode II (spécimen ENF) à droite avec leur système de mesure et de pilotage.

Sur cette base, la force appliquée aux éprouvettes testées sous environnement climatique variable est de l'ordre de 85% de la résistance moyenne obtenue lors des essais monotones, soit un niveau de charge (F/F_s) par poutre variant entre 60 et 90%.

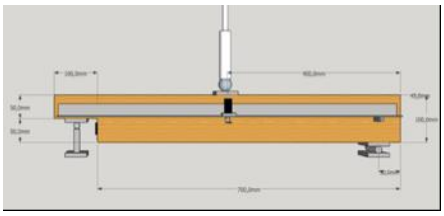


Fig. 2 : Schéma du dispositif des essais de fluage et de mesures sur une poutre entaillée.

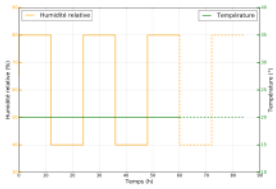


Fig. 3 : Consigne climatique de la salle de durée de vie.

Résultats et Modélisation

La Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture (MLER) n'étant pas directement applicable à un matériau quasi-fragile comme le bois (zone d'élaboration de la rupture de taille non négligeable), nous appliquerons une adaptation de la MLER, dite MLER équivalente, afin d'estimer les courbes de résistance à la propagation de fissure (Morel, 2007). Dans le cadre de la MLEReq, la longueur de fissure est estimée à partir de la complaisance sécante considérée comme correspondant à la complaisance élastique du spécimen. On obtient ainsi la longueur de fissure élastique équivalente qui, dans un matériau purement élastique, produira la même complaisance que celle constatée expérimentalement et liée à la longueur de fissure principale accompagnée de sa zone d'élaboration. Afin de vérifier l'applicabilité de la MLEReq, des cycles de charge-décharge ont été réalisés. La MLEReq est applicable si la complaisance initiale d'un cycle donné passe par le point de décharge du cycle précédent ou, en d'autres termes, si la complaisance initiale d'un cycle donné correspond à la complaisance sécante déterminée à partir du point de décharge du cycle précédent. Si ce comportement est effectif quel que soit le cycle considéré alors, pour tout point de la réponse force-déplacement, la complaisance sécante de l'éprouvette ($\lambda=\delta/P$) pourra être considérée comme correspondant à la complaisance élastique effective du spécimen et la longueur de fissure élastique équivalente pourra en être déduite. Pour les essais de Mode I réalisés à partir de l'essai DCB sur du pin Maritime et pour une gamme de teneurs en eau comprises entre 0 et 30%, la MLEReq est applicable (Phan, 2016) à condition que le temps d'essai pour les teneurs en eau élevées ne soit pas trop important (inférieur à 300s). En effet, si le temps d'essais excède 300s, un déplacement de fluage s'additionne au déplacement élastique et rend inapplicable la MLEReq. Pour ce qui concerne les essais de Mode II, la MLEReq est applicable à condition de minimiser les frottements au niveau de l'entaille sinon un effort additionnel causé par la friction apparaît et rend inapplicable la MLEReq (Fig. 4).

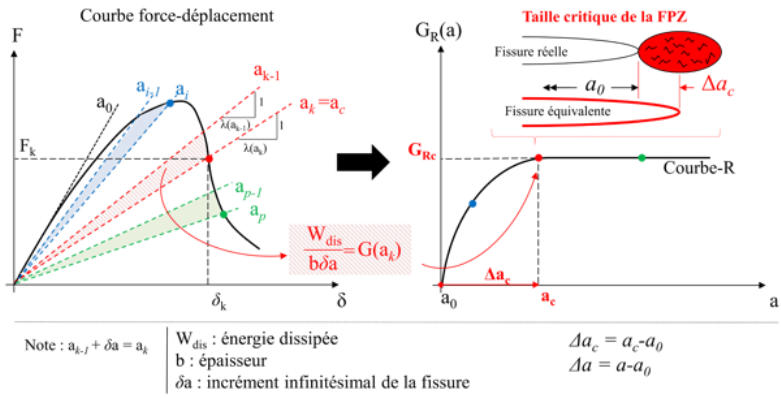


Fig. 4 : Evaluation de la résistance à la propagation de fissure (Courbe-R) (Gangnant, 2016)

L'application de la MLEReq nécessite de connaître la fonction de complaisance du spécimen (l'évolution de la complaisance du spécimen en fonction de la longueur de fissure) pour chaque teneur en eau. Ces fonctions de complaisance $\lambda(a)$ sont estimées pour les spécimens DCB et ENF à partir d'un calcul aux éléments finis prenant en compte les propriétés élastiques du bois attendues en fonction de la teneur en eau. La fonction de complaisance estimée numériquement ne correspondant pas exactement à celle du spécimen testé expérimentalement du fait des imperfections géométriques du spécimen et de la variabilité des propriétés élastiques du bois, un coefficient de correction ψest appliqué à la fonction de complaisance numérique telle que : $\lambda_{cor}(a)= \psi\, \lambda(a)$. Le coefficient de correction ψ est estimé à partir du ratio de la complaisance initiale expérimentale et de la complaisance initiale numérique, $\psi=\lambda_{exp}(a_0)/\lambda(a_0)$, car seules les complaisances initiales (expérimentale et numérique) renvoient à une valeur identique de la longueur de fissure qui correspond alors à la longueur d'entaille initiale $a = a_0$. Ensuite, la longueur de fissure élastique équivalente a_{eq} correspondant à tout point de la courbe force-déplacement est estimé à partir de la valeur de la complaisance sécante en ce point λ_{exp} en résolvant l'équation $\lambda_{exp}=\lambda_{cor}(a_{eq})= \psi\, \lambda(a_{eq})$. La longueur de fissure élastique équivalente a_{eq} étant connue en tout point (dans la suite, la longueur de fissure élastique équivalente a_{eq} sera notée a pour des raisons de simplification), il est alors possible d'estimer la résistance à la propagation de fissure $G_R(a_{eq})$ en fonction de la longueur de fissure élastique équivalente, à partir du taux de restitution d'énergie $G(a)$ (1) (Fig. 4).

$$G(a) = \frac{P^2}{2b}\left(\frac{\partial \lambda_{cor}(a)}{\partial a}\right) = G_R(a) \qquad (1)$$

où b est l'épaisseur de l'éprouvette, P est la force appliquée, λ_{cor}(a) est la complaisance numérique corrigée. L'évolution de $G_R(a)$ est appelée courbe de résistance ou courbe-R. Les courbes-R obtenues présentent une partie croissante associée au développement de la zone d'élaboration de la fissure suivie d'un plateau associé à la propagation auto-similaire de la fissure principale avec sa zone d'élaboration (FPZ) (Bažant et Planas, 1997). Sur cette base, l'ensemble des courbes-R a été ajusté à partir d'une loi puissance pour la partie croissante et d'une constante pour la résistance plateau (2).

$$G_R(a) = \begin{cases} \frac{G_{RC}}{\Delta a_c^{\beta}} \times \Delta a^{\beta} & si \;\; \Delta a < \Delta a_c \\ G_{RC} & si \;\; \Delta a \geq \Delta a_c \end{cases} \qquad (2)$$

où $\Delta a = a - a_0$, représente l'incrément de longueur de fissure élastique équivalente et a_c correspond à la longueur de fissure pour laquelle apparaît la résistance plateau G_{RC}.

Les valeurs moyennes et écart-types de la résistance G_{RC}, de la longueur de fissure a_c, et de l'exposant β des premiers essais sont reportées dans le tableau 1. On peut constater que la résistance plateau G_{RC} ainsi que la longueur élastique équivalente de la zone d'élaboration $\Delta a_c = a_c - a_0$ augmentent avec la teneur en eau. Ainsi, un bois humide sera plus résistant à la propagation de fissure, en mode I et en mode II, qu'un bois sec.

Tab. 1 : Paramètres des Courbe-R de 4 teneurs en eau, valeurs moyennes et (écart-type)

Teneur en eau	≈ 6%		≈ 9%		≈ 12%		≈ 16%	
	Mode I	Mode II	Mode I	Mode II	Mode I	Mode II	Mode I	Mode II
Nbr d'essais	24		22	16	28	22	23	22
G_{RC} [J/m2]	423 (77)		435 (35)	1387 (226)	588 (200)	1920 (534)	646 (173)	2243 (704)
Δa_c [mm]	19 (7)		19 (10)	47 (7)	31 (9)	50 (15)	36 (13)	70 (18)
β	0,25 (0,07)		0,22 (0,06)	0,39 (0,13)	0,27 (0,09)	0,54 (0,17)	0,42 (0,1)	0,71 (0,2)

Conclusion

La teneur en eau du bois a une influence sur l'intensité maximale des mécanismes d'endommagement en mode I et II conduisant à une taille critique de la zone d'élaboration Δa_c et à une résistance critique G_{RC} augmentant avec la teneur en eau. Les essais de fluage réalisés sur les poutres entaillées sous HR variables sont en cours, mais le nombre de ruptures constatées à ce jour est encore trop faible pour que les résultats soient représentatifs. L'amélioration d'une modélisation des durées de vie (temps à rupture) basée sur les résultats des essais de caractérisations de fissuration à diverses teneurs en eau est en élaboration.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via l'Equipex XYLOFOREST (ANR-10-EQPX-16), la Région Nouvelle Aquitaine pour leurs supports techniques et financiers à cette étude et également Gascogne bois pour la fourniture de matériau (pin Maritime**).**

Références

Bažant Z. P., Planas J. (1997). Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. New Directions in Civil Engineering.

Chaplain M., Valentin. G., (2004). From the initiation to the crack propagation in timber beams under various RH condition. Proceeding of the third international Conference of the ESWM, Villa Real, Portugal, p.287-294.

Gangnant A., (2016). Etude de la rupture quasi-fragile d'un béton à l'échelle mésoscopique. Aspects expérimetaux et modélisation. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux.

Husson J-M., (2009). Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire application à la mécanosorption dans le bois. Thèse de doctorat en Génie civil - Université de Limoges.

Jockwer R., (2015). Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich.

Morel S., (2007). R-curve and size effect in quasibrittle fractures: Case of notched structures. Int. J. Solids Struct., vol. 44, no. 13, pp. 4272-4290, Jun.

Phan N.A., (2016). Simulation of time-dependent crack propagation in a quasi-brittle material under relative humidity variations based on cohesive zone approach: application to wood. Thése de doctorat de l'Université de Bordeaux.

Poster A04

Homogénéisation de la couleur du bois de Pin Maritime

MEHATS Jérémy[1,2], CASTETS Laurent[2], GRAU Etienne[1], GRELIER Stéphane[1]

[1] LCPO, ENSCBP, 16 avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex
[2] Gascogne Bois, ZI du Justin, rue de Maïtena, 40260 Castets
jeremy.mehats@gmail.com

Mots clefs : Pin Maritime ; Duramen ; Aubier ; Chromophores ; Blanchiment ; Extractibles ; Lignine

Introduction

Le Pin Maritime, ressource principale de la forêt des Landes en Nouvelle Aquitaine, est une essence qui appartient à la famille des résineux et qui a la particularité de posséder un duramen différencié de couleur rouge, contrairement à l'aubier qui lui est plutôt jaune.

Cette différence de couleur est une cause majeure de la dépréciation de sa valeur marchande vis-à-vis de certains usages. Un des enjeux actuels est donc de trouver une méthode adaptée pour homogénéiser la couleur du duramen et de l'aubier du pin maritime

La couleur d'un matériau vient de sa capacité à absorber et renvoyer certaines longueurs d'onde d'un rayonnement lumineux. D'un point de vue chimique, cela se traduit par la présence de structures chimiques possédant des chromophores capables d'interagir avec ce rayonnement lumineux. Ces structures possèdent des enchainements de doubles et simples liaisons associés à des groupements chimiques attracteurs ou donneurs d'électrons. Dans le bois il s'agit principalement de la lignine et des extractibles. Par conséquent, les traitements d'homogénéisation de la couleur devront agir sur ces composés.

Plusieurs réactions chimiques sont envisageables pour modifier ou éliminer ces chromophores et les plus courantes, utilisées notamment dans les procédés de blanchiment des pâtes à papier, sont les réactions d'oxydations utilisant des peroxydes. Ces derniers sont préférés aux dérivés chlorés en raison de leur impact environnemental moindre.

Matériels et méthodes

Le bois a été fourni par la société Gascogne Bois après sciage, il n'a pas subi de séchage.

Les extractibles présents dans le duramen et l'aubier de pin maritime ont été extraits par extraction solide/liquide (Soxhlet) avec de l'acétone pendant 8h à 72°C (3 à 6 cycles par heure). Une seconde méthode d'extraction Soxhlet a été aussi développée associant cette fois une extraction au dichlorométhane (55°C/8h, 3-6 cycles/heure puis une extraction à l'acétone (72°C/8h, 3-6 cycles/h). Après évaporation des solvants, les extraits ont été analysés par spectroscopie infrarouge par réflectance totale atténuée (ATR, Absorbance, 64 scans), par chromatographie en phase gazeuse associée à de la spectrométrie de masse (GC-MS, méthylation préalable à l'hydroxyde de triméthylsulfonium), par spectroscopie par résonance magnétique nucléaire du carbone (RMN ^{13}C, $CDCl_3$, 4096 scans) et par spectroscopie UV-Visible (100mg/L dans le méthanol, de 600 à 250nm). Les poudres de bois ont été analysées par ATR et par colorimétrie (colorimètre Nix Pro Color, pressées sous forme de pastilles, moyenne de 5 scans). Du peroxyde d'hydrogène à 35% H2O2 (4%), de la soude NaOH (1%) et du métasilicate de sodium Na_2SiO_3 (0,1%) ont été utilisés pour la solution de blanchiment (solution aqueuse).

Résultats

Les rendements en extrait sec obtenus pour le duramen varient de 12 à 13% et ceux obtenus pour l'aubier varient de 3 à 6% ; ces résultats sont en accord avec la littérature et notamment les travaux de Lloyd J. A. (1978). Les analyses ATR ont permis d'identifier les signaux caractéristiques d'acides résiniques et les analyses GC-MS ont confirmé la présence des acides abiétique, déhydroabiétique, palustrique et pimarique. Des sesquiterpènes (longifolène et β-longipinène) ainsi que des acides gras (acide oléique) ont également été identifiés par cette méthode. Les analyses de spectroscopie UV-V ont montré la présence de structures phénoliques, absorbance caractéristique à 290nm selon les travaux de Mayer I. (2006) qui sont en cours d'identification.

La seconde méthode d'extraction a permis d'isoler deux extraits de couleurs différentes (Fig. 1). Des bandes de vibrations caractéristiques des phénols ont été identifiées dans les spectres ATR de l'extrait acétone. Un flavonoïde (dihydrokaempférol) et un stilbènoide (pinosylvine) ont été identifiés grâce à des analyses RMN-^{13}C et GC-MS d'après les travaux de Šmidrkal J. (2010) et de Kwak J. H. (2009).

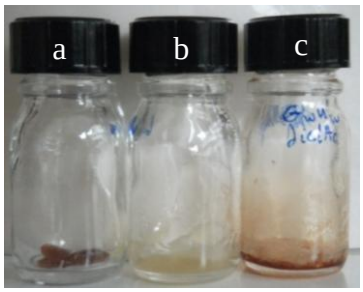


Fig. 1 : Extraits de Pin maritime ; a : extrait méthode 1, b: extrait dichlorométhane méthode 2, c: extrait acétone méthode 2

Après les étapes d'extraction et d'identification des chromophores, les traitements d'homogénéisation ont été réalisés sur des poudres de bois. La poudre a été mise en suspension dans la solution de blanchiment d'après le protocole développé dans les travaux de Liang T. (2015). Le pH et la concentration en peroxyde d'hydrogène ont été suivis pendant la réaction. Après rinçage et séchage à 50°C sous vide, la poudre a été pressée sous forme de pastille et analysée par colorimétrie (système CIE L*a*b*). Le traitement de blanchiment a pour effet de diminuer les paramètres a* et b* de l'aubier et du duramen et d'augmenter le paramètre L*. La Fig. 2 montre l'évolution de la couleur du duramen et de l'aubier dans le plan a*b* avec une diminution de la différence de couleur entre les deux zones du bois.

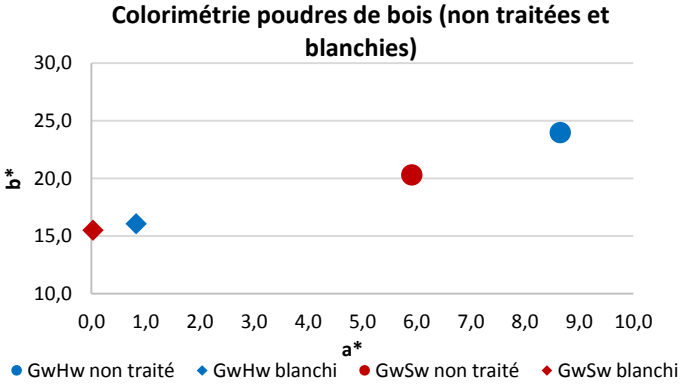


Fig. 2 : Evolution des paramètres colorimétriques des poudres de bois après traitement de blanchiment

Un vieillissement sous irradiation UV (Irradiance de 0,2mW/cm² à 365nm) a été conduit afin d'observer l'évolution de la couleur. Une augmentation des paramètres a* et b* a été observée ainsi qu'une diminution du paramètre L*. L'irradiation a pour effet de diminuer encore la différence de couleur ($\Delta C_{Sw/Hw}$ passant de 1 à 0,5 au bout de 69 jours d'irradiation).

La Fig. 3 montre l'évolution des paramètres colorimétriques pendant l'irradiation pour des poudres blanchies et la Fig. 4 les résultats pour les poudres non blanchies.

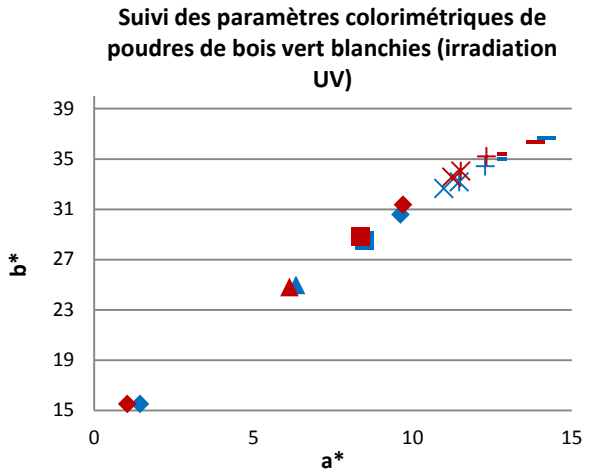


Fig. 3 : Evolution des paramètres colorimétriques après irradiation UV de poudres blanchies

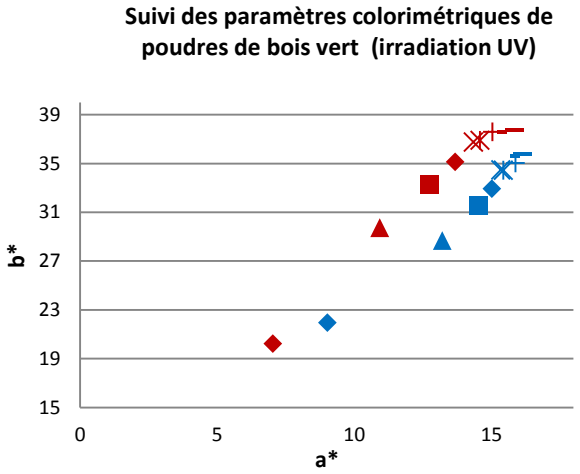


Fig. 4 : Evolution des paramètres colorimétriques après irradiation UV de poudres non blanchies

Conclusion et perspectives

L'homogénéisation de la couleur du bois, apportée par le traitement chimique a ainsi été conservé après photo-vieillissement sous irradiation UV. La quantification des dérivés phénoliques identifiés dans les extraits de Pin maritime par des analyses GC-MS et RMN est en cours pour déterminer la corrélation entre leur concentration dans le bois et la couleur.

Références:

Kwak J.H., Kang M.W., Roh J.H., Choi S.U., Zee O.P. (2009) Cytotoxic phenolic coumpounds from Chionanthus retusus, Archives of Pharmacal Research, 32, 1681-1687.

Liang T., Wang L. (2015) An environnementally safe and nondestructive process for bleaching birch veneer with peracetic acid, Journal of Cleaner Production, 92, 37-43.

Lloyd J.A. (1978) Distribution of extractives in pinus radiata earlywood and latewood, New Zealand Journal of Forestry Science, 8, 288-294

Mayer I., Koch G., Puls J. (2006) Topochemical investigations of wood extractives and their influence on colour changes in American black cherry (Prunus serotina Borkh.), Holzforschung, 60, 589-594

Šmidrkal J. (2010) Modified approach for preparing (E)-stilbenes related to resveratrol, and evaluation of their potential immunobiological effects, Collection of Czechoslovak Chemical Communications, 75, 175-186.

Poster A06

Développement et caractérisation d'éco-structures composites

GUELOU Romain[1], EYMA Florent[1], CANTAREL Arthur[1], CASTANIE Bruno[1], BOUVET Christophe[1], SUSAINATHAN John[1]

[1]Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT MINES ALBI, UTIII, CNRS, 3 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse
romain.guelou@iut-tarbes.fr

Mots clefs : absorption d'énergie ; composites ; sandwich ; contreplaqué ; impact ; crash-box

Contexte et objectifs

Les structures sandwichs sont des structures composites légères qui sont largement utilisées dans de nombreux secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique, le spatial, le milieu maritime pour de nombreux avantages comme par exemple une rigidité et une résistance spécifique à la flexion élevées, un excellent amortissement, ou encore un bon isolant thermique (Zenkerts (1997) et Bucci (2017)). La réduction d'émission de carbone et le développement durable sont des objectifs communs dans l'industrie du transport. Un moyen d'atteindre ces objectifs est la mise en œuvre de matériaux légers basés sur de nouveaux matériaux. Les panneaux sandwichs avec âme en contreplaqué et peaux en composites semblent être de bons candidats. Le contreplaqué est encore utilisé dans la construction d'avions artisanaux et, jusque dans les années 1990, a été utilisé dans la conception d'aéronefs. La combinaison contreplaqué et composites semble être pertinente pour l'allégement des structures et a été étudiée statiquement et à l'impact au laboratoire par Susainathan (2017). Les structures sandwichs ayant des propriétés spécifiques élevées, un faible coût, et une bonne capacité de dissipation d'énergie semblent être des candidats prometteurs pour des applications d'impact et de crash dans le secteur du transport.

Les tests d'impact se classifient généralement en fonction de la vitesse d'impact en trois catégories : basse vitesse (<10m/s), moyenne vitesse (10 – 50m/s), et haute vitesse (50 – 1000m/s). Cette présentation est axée sur des essais d'impacts à basse vitesse et présente les travaux de Susainathan (2018) qui a montré que les structures sandwichs à base de contreplaqué ont des propriétés intéressantes à l'impact en termes d'énergie absorbée, énergie spécifique absorbée, indentation, et compression après impact. Des perspectives sur des essais de comportement au crash sont également évoquées.

Matériel et méthode

L'âme du sandwich étudiée est donc du contreplaqué de deux natures différentes identifiées « plywood A » et « plywood B ». L'empilement et l'épaisseur des plis du contreplaqué sont présentés dans la Fig. 1. Les deux types de contreplaqué ont la même épaisseur dans le but de minimiser les effets de géométrie par rapport à la flexion du sandwich mais aussi pour rendre la comparaison plus facile.

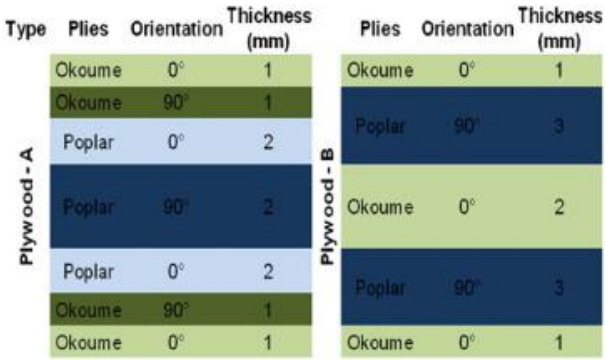


Fig. 1 : Empilement des plis des deux types de contreplaqué - Susainathan (2018)

Les peaux sont réalisées en aluminium, fibres de carbone, de verre et de lin qui correspondent aux peaux les plus représentatives des peaux utilisées dans la construction de structures sandwichs actuelles. Huit configurations différentes de structures sandwichs à base de bois ont ainsi été constituées (voir Tab. 1). Une référence a été utilisée pour comparer les performances des sandwichs élaborés. Elle correspond à un nid d'abeilles (constitué de fibres de kevlar avec des peaux en fibres de carbone et de verre) utilisé par Airbus en tant que plancher dans les soutes d'avions.

Tab. 1 : Réalisation des sandwichs par Susainathan (2018)

Ame	Peau	Procédé	Densité	Epaisseur (mm)	Spécification procédé
Plywood A	/	/	0,461	10	/
Plywood B	/	/	0,433	10	/
Plywood A	Aluminium	/	0,678	11	/
Plywood A	Verre	Moulage sous vide de pré-imprégnés	0,638	12	160°C pendant 3h
	Carbone		0,569		90°C pendant 30min puis 125°C pendat 1h
Plywood B	Lin	Thermo-compression de pré-imprégnés	0,488	12	120°C pendant 1h, pression de 4bar
	Carbone		0,614		90°C pendant 30min puis 125°C pendat 1h, pression de 4bar
	Verre		0,609		160°C pendant 3h, pression de 4bar
Nid d'abeilles	Carbone et verre	/	0,233	10	/

Concernant les essais d'impact, ils ont été réalisés à l'aide d'un poids tombant permettant d'atteindre une énergie d'impact de 5, 10, et 15J, puis ont été suivis d'une analyse tomographique. Les échantillons mesurent 150 × 100m^2 et sont simplement appuyés sur une fenêtre de 125 × 75 mm^2 au cours de l'impact.

Résultats expérimentaux et discussion

Les résultats d'impact sont présentés dans les Fig. 2 et 3 ainsi que dans le Tab. 2. Plusieurs critères sont regardés au cours d'essais d'impact. Le premier résultat exploitable est celui des courbes forces-déplacement. Ces dernières nous permettent l'extraction de l'énergie absorbée au cours de l'impact par la structure. L'énergie absorbée rapportée au poids de la structure nous permet d'extraire l'énergie spécifique d'absorption (J/g ou kJ/kg), appelée SEA par la suite (Specific Energy Absorption). Un autre critère très souvent regardé est celui de l'indentation permanente causée par l'impacteur. L'indentation correspond à l'enfoncement généré par l'impacteur et peut se mesurer à l'aide d'un comparateur ou par tomographie. Le ratio entre l'énergie absorbée et l'indentation (J/mm) générée a également été étudié. Ce ratio propose un compromis entre l'énergie absorbée de la structure et son indentation suivant l'application recherchée. Enfin, il est fréquent qu'une compression après impact soit réalisée afin d'avoir un regard sur les propriétés mécaniques résiduelles de l'éprouvette.

Exem

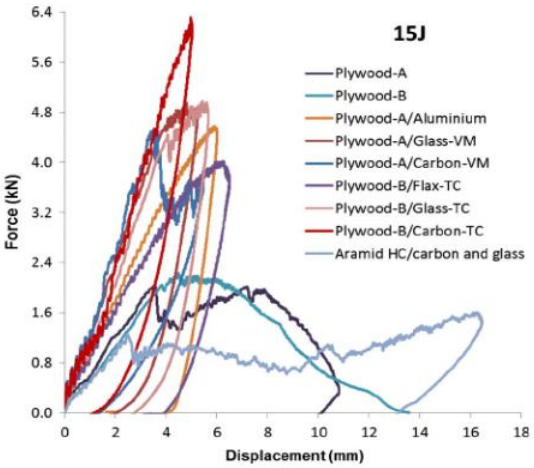


Fig. 2 : Résultats des impacts à 15J - Susainathan (2018)

Exemple f

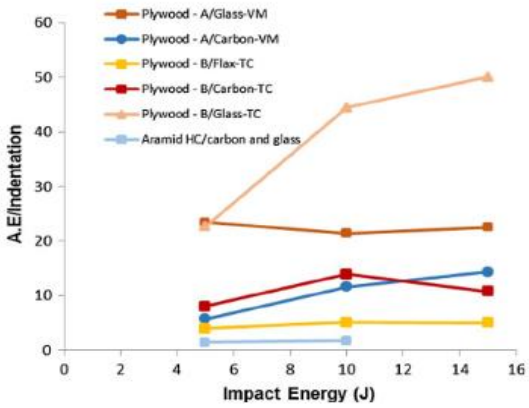


Fig. 3 : Ratio énergie absorbée / indentation – Susainathan (2018)

En termes d'énergie absorbée, les contreplaqués seuls A et B ainsi que le contreplaqué A associé à des peaux en aluminium montrent une absorption d'énergie comparable selon le niveau d'énergie. Concernant l'indentation générée, le contreplaqué A est le plus performant dû au nombre plus important d'interfaces conduisant à un meilleur comportement transverse. A cause de la densité de l'aluminium, le sandwich avec les peaux en aluminium voit une SEA moins importante que les deux types de contreplaqué A et B. Par rapport au matériau de référence, ces trois matériaux (2 contreplaqués et sandwich avec peaux aluminium) voient une indentation moins importante, cependant le matériau de référence absorbe plus d'énergie et au vu de sa faible densité permet l'obtention d'une SEA élevée. Enfin, ces trois matériaux voient une indentation plus grande que celle des sandwichs avec les peaux en composites.

A propos des sandwichs avec les peaux en composites, nous avons constaté que les peaux en lin et verre proposent une absorption d'énergie plus élevée que celle des peaux en carbone de par la grande rigidité du carbone. Cependant, ce sont les peaux en fibres de verre qui voient l'indentation la plus faible notamment grâce à une bonne adhésion des peaux sur l'âme obtenu par thermo-compression.

Enfin, en prenant en compte uniquement l'énergie spécifique absorbée, nous pouvons observer que les sandwichs avec les peaux en fibres de lin sont d'excellents candidats en comparaison au matériau de référence et aux autres sandwichs grâce à leur faible poids et le niveau de l'énergie spécifique absorbée. En prenant en compte le ratio énergie absorbée et indentation, le meilleur candidat pour des sollicitations à l'impact semblent être le sandwich avec peaux en fibres de verre.

Tab. 2 : Energie absorbée, indentation, et SEA en fonction du type de sandwich Susainathan (2018)

	Energie absorbée (%)			Indentation (mm)			SEA (J/g)		
Energie d'impact (J)	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Plywood A	51	81	99	1,56	1,87	perforation	5	19	32
Plywood B	67	70	98	1,65	2,3	perforation	8	16	35
Plywood A + peaux aluminium	72	83	81	1,89	2,65	3,03	5	13	18
Plywood A + peaux carbone	51	55	65	0,49	0,49	0,68	5	10	17
Plywood B + peaux carbone	53	49	54	0,36	0,36	0,77	5	8	13

	Energie absorbée (%)			Indentation (mm)			SEA (J/g)		
Energie d'impact (J)	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Plywood A + peaux verre	58	75	70	0,13	0,38	0,68	5	13	17
Plywood B + peaux verre	54	68	75	0,13	0,16	0,24	5	11	20
Plywood B + peaux lin	68	72	79	0,87	1,45	2,44	7	15	25
Matériau de référence	93	93	88	3,35	5,57	/	21	41	59

Conclusion et perspectives

Les essais d'impact basse vitesse/basse énergie de sandwichs ont été menés à 5, 10, et 15J. Deux types de contreplaqué, un matériau de référence utilisé par Airbus, mais aussi des sandwichs avec une âme en contreplaqué et des peaux en aluminium, fibres de carbone, de verre, et de lin ont été impactés.

Les résultats montrent qu'en termes d'énergie spécifique absorbée, le sandwich ayant l'âme en contreplaqué et les peaux en fibres de lin présente la SEA la plus élevée, de 25J/g, de par sa faible masse volumique. En prenant en considération l'énergie absorbée et l'indentation générée par l'impacteur, la combinaison contreplaqué et fibres de verre ressort comme étant le meilleur candidat pour ce type de sollicitation. Des essais de compression après impact ont aussi été menés (non présentés ici) et ont montré que les sandwichs avec peaux en fibres de verre présentaient les meilleures propriétés mécaniques résiduelles par rapport aux fibres de lin et de carbone. Aux regards des propriétés mécaniques étudiées et de l'énergie d'impact, les peaux en fibres de verre sont également supérieures au matériau de référence.

Les performances à l'impact de la combinaison contreplaqué et peaux en composites ont montré des résultats très intéressants tant en termes d'énergie absorbée, de SEA, d'indentation, et de compression après impact. Aujourd'hui, nous travaillons à utiliser cette même combinaison pour voir quelles performances peuvent fournir ces sandwichs pour une application d'absorption d'énergie sans conservation de l'intégrité structurelle après écrasement, à savoir pour la réalisation de crash-box. L'idée est d'orienter différemment le sandwich, de le solliciter en statique et en dynamique, afin d'observer ses modes de ruines (évasement, fragmentation, évasement+fragmentation ?) afin d'avoir accès à sa SEA.

Références

Bucci V, Corigliano P, Crupi V, Epasto G, Guglielmino E (2017). Experimental investigation on Iroko wood used in shipbuilding. Proc Mech Eng C-J Mec 2017,231 :128-39.

Susainathan J, Eyma F, De Luycker E, Cantarel A, Castanié B (2017). Manufacturing and quasi-static bending behavior of wood-based sandwich structures. Compos Struct 2017 ;182 :487-504.

Susainathan (2017), Development and characterization of wood based eco-structures. PhD University of Toulouse, 2017.

Susainathan J, Eyma F, De Luycker E, Cantarel A, Castanié B (2018). Experimental investigation of impact behavior of wood-based sandwich structures. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 109 :10-19

Zenkerts D (1997). The handbook of sandwich construction. United Kingdom : Engineering Materials Advisory Services Ltd. ; 1997.

Poster A07

Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs

UWIZEYIMANA Placide[1], EYMA Florent[1], PERRIN Marianne[1]

[1]Institut Clément Ader, IUT de Tarbes - Dépt GMP, 1 rue Lautréamont, 65000 Tarbes
placide.uwizeyimana@iut-tarbes.fr

Mots clefs : Bois lamellé-collé ; ouvrages d'art en bois ; durabilité ; méthodes non destructives ; cycles humidité-séchage ; caractéristiques mécaniques.

Contexte et objectifs

Aujourd'hui une forte expansion d'ouvrages d'art en bois est favorisée par l'utilisation de bois lamellé-collé (LC) (AFGC 2013). Ce produit innovant et de haute technologie a permis de répondre aux problématiques de développement durable. Par son caractère renouvelable, naturel et écologique, le bois devient donc un matériau de construction privilégié. Néanmoins, les propriétés mécaniques du bois de construction changent avec la variation de l'humidité. Etant exposés aux conditions extérieures cycliques d'humidité et de température, les ouvrages d'art (OA) en bois LC présentent des problèmes de dégradations liés aux cycles d'humidification-séchage (H-S) notamment la délamination, la fissuration et les variations dimensionnelles dues au retrait-gonflement (LCPC 2008). L'interaction de ces phénomènes entraine l'affaiblissement mécanique des ouvrages en bois limitant ainsi leur développement (SETRA 2006 ; LCPC 2008). De manière à répondre à cette problématique, il est primordial de suivre en continu la santé structurale des ouvrages en bois afin d'avoir une prédiction plus fiable de leur durée de vie résiduelle. Dans la construction, la santé structurale s'évalue sur le long terme par des essais de durabilité. Pour cela, on propose une méthodologie de suivi des propriétés mécaniques des poutres LC au cours du temps. L'objectif est de créer une base des données « durabilité » qui permettra de prédire la durée de vie résiduelle des OA en bois, à partir de mesures de l'humidité en continu.

Matériels et méthodes

Diverses méthodes existent pour la mesure de l'humidité du bois. Cependant, les plus souvent utilisées dans les OA en bois sont basées sur des mesures résistives (Franke et al. 2013 ; Koch et al. 2016). Elles consistent à mesurer l'humidité par l'intermédiaire de variation de résistivité du matériau. Certains modèles d'instrumentation existent pour suivre l'humidité dans les OA en bois (Brischke et al. 2008), mais ne permettent pas de suivre l'humidité localement, au niveau des lamelles des poutres LC, et donc d'identifier au plus près les causes d'endommagement de ces éléments. Pour cela, une technique d'instrumentation basée sur des capteurs intégrés entre les lamelles du bois LC a été développée par Li et al. (2017) au laboratoire Institut Clément Ader. Suite à ces travaux, nous avons d'abord identifié la taille de capteurs par rapport aux dimensions des éprouvettes. Nous avons ensuite développé et calibré un système d'enregistrement en continu qui permettra de suivre les données d'humidité détectée par les capteurs. Si l'objectif affiché est de suivre la durabilité des OA bois en fonction des cycles climatiques H-S, un passage en laboratoire est nécessaire pour valider les protocoles d'instrumentation in situ. Pour se rapprocher de la réalité, nous avons identifié les cycles H-S présents sur les OA en bois afin de mettre en place des cycles H-S accélérés. D'après cet inventaire, les cycles accélérés ont été définis dans le domaine hygroscopique entre 10% d'humidité et le point de saturation des fibres. Sachant que les poutres des OA sont

généralement sollicitées en flexion, les essais de flexion quatre points en cours permettront d'identifier le nombre de capteurs n'influençant pas la résistance mécanique des poutres LC.

Conclusions et perspectives

L'identification de la taille de capteurs nous a permis de calibrer le système et de mesurer de l'humidité en continu. Les essais en cours consistent d'une part, à identifier la durée d'un cycle H-S accéléré par l'identification des cinétiques d'humidification et de séchage, et d'autre part, à valider la résistance mécanique des poutres bois LC en présence des capteurs intégrés entre les lamelles. Il s'agira ensuite d'étalonner les courbes reliant la résistance électrique et l'humidité du bois. Ces courbes serviront pour le suivi de l'humidité des échantillons par mesures résistives. Par la suite, les essais de durabilité seront mis en place afin d'établir un modèle permettant de lier l'affaiblissement mécanique des poutres LC en fonction des cycles H-S. Ce modèle servira à la prédiction de la durée de vie résiduelle des OA en bois. L'objectif sous-jacent étant d'apporter des propositions en vue d'une maintenance préventive des structures en bois LC.

Références

AFGC (2013) Guide pour la conception des Ouvrages d'Art en Bois, 293 pages

Brischke C., Rapp A. O., Bayerbach R. (2008) Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes, Building and Environment, vol. 43, no. 10, pp. 1566–1574.

Franke B., Franke S., Mueller A., Vogel M., Scharmacher F., Tannert T. (2013) Long term monitoring of timber bridges - Assessment and results, Advanced Materials Research, vol. 778, pp. 749–756.

Koch J, Simon A, Arndt RW (2016) Monitoring of moisture content of protected timber bridges. In: Proceedings of WCTE 2016 (World Conference on Timber Engineering), Vienna, Austria.

LCPC (2008) Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois, Guide technique du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussée), 71 pages

Li H, Perrin M, Eyma F, Jacob X, Gibiat V (2017) Moisture content monitoring in glulam structures by embedded sensors via electrical methods. Wood Science and Technology.

SETRA (2006) Les ponts en bois : Comment assurer leur durabilité, Guide technique du SETRA (Service d'études technique des routes et autoroutes), 123 pages

Poster A08

Évaluation du comportement dynamique des planchers mixtes bois-béton : Corrélation entre confort des usagers et modèles de dimensionnement

AMOUZOU Kodzo Vioto[1,2], LANATA Francesca[1], LOUKILI Ahmed[2]

[1]Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
[2] Ecole Centrale de Nantes, GeM, Nantes, France
kodzo.amouzou@ecoledubois.fr

Mots clefs : Planchers mixtes bois-béton ; mesures *in-situ* ; confort des occupants

Contexte et objectif

Des structures composites bois-béton ont été développées à l'origine pour les ponts et la réhabilitation des planchers de bois existants, mais aujourd'hui elles ont de nouvelles applications dans les immeubles à plusieurs étages. L'intérêt de combiner le bois et le béton est celui d'augmenter la rigidité et la densité de la structure mixte (Slowron et al 2010). Mais malgré les connaissances actuelles sur le bois et le béton, la combinaison de ces deux matériaux fait l'objet de nombreuses études dans le domaine de la construction, plus précisément dans l'étude du comportement dynamique de planchers mixtes bois-béton (Bregulla et al 2013, Ghafar 2015). Bien que la conception aux états limites de service vis-à-vis des vibrations soit intégrée dans plusieurs codes, dans de nombreux cas les règles existantes ne sont pas suffisantes et des problèmes avec les vibrations de plancher se posent (Brandt et al 2015). Cela est particulièrement vrai lorsque des portées plus longues sont utilisées, des conditions limites différentes sont conçues et mises en œuvre et / ou des matériaux à haute résistance sont utilisés. La gravité du problème de vibration réside dans le fait que parmi les trois principaux systèmes structuraux dans les bâtiments, les planchers, les toits et les murs, les planchers sont les seuls systèmes avec lesquels les occupants humains sont en contact physique constant. Par conséquent, toute lacune dans la performance peut être une source d'agacement pour les occupants. L'objectif de la thèse est d'étudier le comportement dynamique des planchers mixtes bois-béton utilisés dans différents types de bâtiments afin de mieux cerner les critères d'évaluations du confort et leurs limites, pour ensuite proposer un outil de calcul adéquat, améliorant la prise en compte de plus de paramètres ayant un impact sur le confort des occupants.

Matériels et méthodes

Une étude des approches analytiques dans les guides et codes de calculs (Eurocode 5 et les annexes nationales) a été faite. Un banc d'essais modulable, capable de supporter des portées jusqu'à 7.8 m et des largeurs jusqu'à 3.4 m a été conçu. Ce dernier permettra de tester, en conditions de laboratoire (modifier les conditions aux limites, la rigidité des appuis, et prendre en compte les cloisons), les différents paramètres dynamiques (fréquence, amortissement, *etc.*) (Fig. 1). Une campagne de mesures *in-situ* est lancée dans le cadre de ce projet de recherche. Pour l'instant, des mesures sont faites à Nantes et à Paris sur des planchers mixtes bois-béton à l'aide d'accéléromètres. (Fig. 2). Les accélérations ont été mesurées en faisant varier la position des capteurs et la charge sous différents types de sollicitations (la marche, la course, le lâché de sacs de sable à la main, le lâché de sacs de sable grâce à un châssis). Afin de déterminer le spectre du signal, un code de traitement de signal a été élaboré sous Matlab dans le but de convertir le signal du domaine temporel en ses différentes composantes de fréquence. Ces données ont été analysées et comparées aux données de calculs analytiques.

Fig. 1 : Banc d'essai modulable

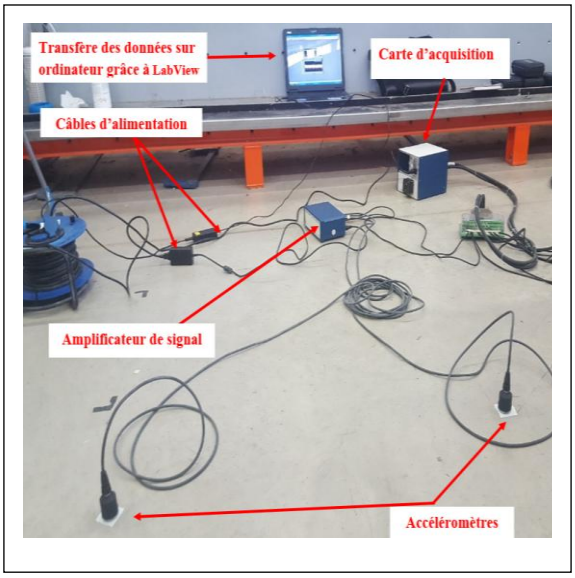


Fig. 2 : Appareillage de mesure

Résultats

Les premiers résultats en termes de fréquence sur le plancher de l'ESB ont montré des écarts entre les mesures de conception et les mesures *in-situ* (Fig. 3, Fig. 4, Tab. 1).

Fig. 3 : Sollicitation à la marche

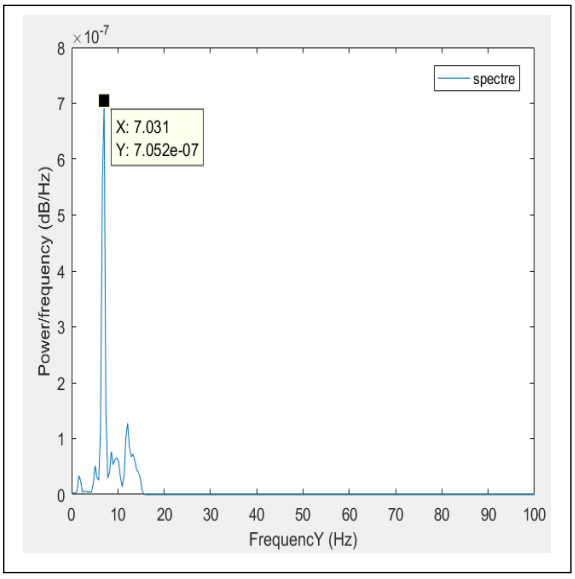


Fig. 4 : spectre de fréquence

L'écart entre les données de conception et les mesures *in-situ* est beaucoup plus grand avec l'équation (1). Cela est justifié parce que l'équation (1) introduit une simplification supplémentaire, en supposant que le rapport de la rigidité équivalente transversale et longitudinale d'un plancher en bois est toujours faible et que, par conséquent, le deuxième terme racine carrée de l'équation (3) peut être supposé égal à 1. L'équation (2) est plus précise que l'équation (1). Elle inclut le terme quadratique autour de (L / B) pour refléter l'effet de la rigidité transversale, cependant, omet un terme de $(L / B)^2$.

Tab. 1 : Calculs et limites des fréquences fondamentales

Normes	Fréquences	Valeurs
EC5	$f = \frac{\pi}{2L^2}\sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} > 8Hz$ (1)	4.89 Hz
Annexe EC5 Autriche	$f = \frac{\pi}{2L^2}\sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}\sqrt{1+\left(\frac{L}{B}\right)^4 \frac{(EI)_B}{(EI)_L}} > 8Hz$ (2)	5.81 Hz
Annexe EC5 Finlande	$f = \frac{\pi}{2L^2}\sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}\sqrt{1+\left[2\left(\frac{L}{B}\right)^2+\left(\frac{L}{B}\right)^4\right]\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} > 9Hz$ (3)	6.51 Hz

La fréquence estimée par Timoshenko (3) est proche des mesures réelles parce que le rapport entre les rigidités équivalentes transversale et longitudinale d'un plancher mixte bois-béton ne tend pas vers zéro, par conséquent, le rapport de la portée et de la largeur du plancher influence la fréquence. Ainsi, assimiler le plancher mixte bois-béton à une plaque orthotrope parait être la meilleure approche, mais ne donne toutefois pas une corrélation suffisante.

Perspectives

Il s'agira de poursuivre les mesures expérimentales (mesure *in-situ* et de laboratoire) sur d'autres types de planchers mixtes bois-béton, d'étudier d'autres paramètres dynamiques (la déflexion, la réponse en vitesse sous l'impulsion de 1Ns), de proposer un modèle numérique donnant une meilleure corrélation, c'est à dire améliorer et corréler le modèle aux mesures expérimentales.

Remerciements

Ces travaux ont été rendus possibles grâce au financement de CODIFAB et de l'ESB, et aux laboratoires LIMBHA et GeM.

Références

Slowron A., et al. (2010) Comportement physique et mécanique des planchers mixtes bois-béton, Rapport n°13 CSTC.

Bregulla J., Harris R., Paine K., Skinner J., Walker P. (2013) Ultra-thin topping upgrades for improved serviceability performance, Advanced Materials Research, 778:673–681.

Ghafar H.A. (2015) Dynamic behaviour of LVL-concrete composite flooring systems. Ph.D Thesis, University of Canterbury, New Zealand.

Brandt A., Jarnerö K., Olsson A. (2015) Vibration properties of a timber floor assessed in laboratory and during construction, Eng. Struct., 82:44–54.

Poster A09

Potentiel du bois de *Cordia trichotoma* pour la réalisation de panneau lamellé-collé sur chant ou Edge Glued Panel (EGP) : étude préliminaire

TRIANOSKI Rosilani[1*], IRLE Mark[2], RICHARD Tristan[2], MICHAUD Franck[2], BELLONCLE Christophe[2], IWAKIRI Setsuo[1]

[1] Université Fédérale du Paraná, Curitiba, Brésil
[2] Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
rosilani@ufpr.br

Mots clefs : Collage; Panneau lamellé-collé sur chant; Essence native; Produit à haute valeur ajouté.

Contexte et objectifs

Au Brésil, les principales essences utilisées dans l'industrie du bois appartiennent aux genres Pinus et Eucalyptus et proviennent majoritairement des forêts plantées du Sud et Sud-Est du pays. Bien que ces essences dominent largement le marché, il est essentiel de développer la recherche visant à augmenter la gamme des espèces utilisées dans l'industrie afin d'améliorer en qualité et en performance les produits existants, mais aussi de développer de nouveaux produits.

Ainsi l'essence *Cordia trichotoma* (Louro pardo), peu connue pour ses caractéristiques technologiques, pourrait constituer une alternative en terme de matière première pour les produits à haute valeur ajoutée. Appartenant à la famille Boraginaceae, elle est native et son aire de dispersion s'étend du Nord au Sud du Brésil (aires tropicales et subtropicales). D'autre part, sa croissance rapide, son développement physionomique (tronc droit) et la qualité de son bois lui confèrent tous les atouts pour être exploitée à des fins commerciales. Enfin, du fait de sa densité moyenne (entre 0,60 et 0,80 g/cm^3), sa bonne résistance mécanique, sa facilité d'usinage et son aspect esthétique agréable, elle pourrait se démarquer dans les domaines de l'ameublement de luxe, le revêtement ou même la construction (Carvalho, 2006).

Ce bois pourrait donc potentiellement voir son utilisation s'appliquer aux domaines des produits à haute valeur ajoutée, comme par exemple les panneaux EGP (Edge Glued Panel ou panneau lamellé-collé sur chant). Ces panneaux présentent l'avantage de réduire les tensions dimensionnelles tout en augmentant la répartition des efforts mécaniques, ce qui leurs confèrent un meilleur rapport qualité/prix. Ils sont considérés comme des produits à hautevaleur ajoutée car ils permettent de valoriser les sous-produits bois et présentent en fin de production des caractéristiques esthétiques similaires au bois brut. Leur utilisation se destine principalement à la confection de meubles et portes.

Outre la volonté de produire des connaissances sur les espèces peu étudiées, cette recherche s'inscrit dans une démarche de développement des produits à haute valeur ajoutée. Ainsi l'objectif est d'apprécier l'utilisation de *Cordia trichotoma* pour la réalisation de panneau panneau lamellé-collé sur chant (EGP).

Matériel et méthodes

Le bois utilisé provient d'une plantation expérimentale de l'état de Santa Catarina, dans le Sud du Brésil. L'échantillonnage a été effectué sur cinq arbres qui ont été sciés, séchés à l'air libre, puis conditionné à 14% d'humidité. Le matériel a ensuite été transformé en latte de dimensions 310 x 60 x 25 mm, après quoi la densité a été mesurée en respectant la norme NP

EN 323 (2002) et enfin les lattes ont été collées en bois de bout (finger-joint) et sur chant. Le collage en bout a été effectué avec un adhésif à base d'émulsion de polymères isocyanate (EPI) au grammage de 150 g/m² ; une pression de 1 MPa a été appliquée pendant 30 secondes en presse à froid. Pour le collage sur chant, outre l'EPI, des adhésifs vinylique (PVAc D4), polyuréthane (PUR) et mélamine urée-formol (MUF) ont été utilisés, tous avec un grammage de 200 g/m². Une pression de 0,8 MPa a été appliquée pendant 2 heures pour le PVAc D4, 1 heure pour les EPI et PUR, et 5 heures pour le MUF, en presse froide. Les paramètres de production sont en accord avec les indications des fabricants d'adhésifs et les conditions utilisées dans l'industrie brésilienne de fabrication des EGP.

La qualité de collage des entures multiples en bout a été évalué selon la norme ASTM 5572 (2005). Cette dernière préconise de tester les échantillons préparés selon les trois procédures de pré-traitement, à sec, à haute température et triple cycle (3-cycle Soak). Quant aux collages sur chants, les normes EN 13353 (2003) et EN 13354 (2009) ont été suivies, préconisant un pré-traitements à sec, à l'eau froide pendant 24 h (SWP / 1), à l'eau bouillante pendant 6 h (SWP / 2) et le cycle de l'eau bouillante (SWP / 3).

Premiers Résultats

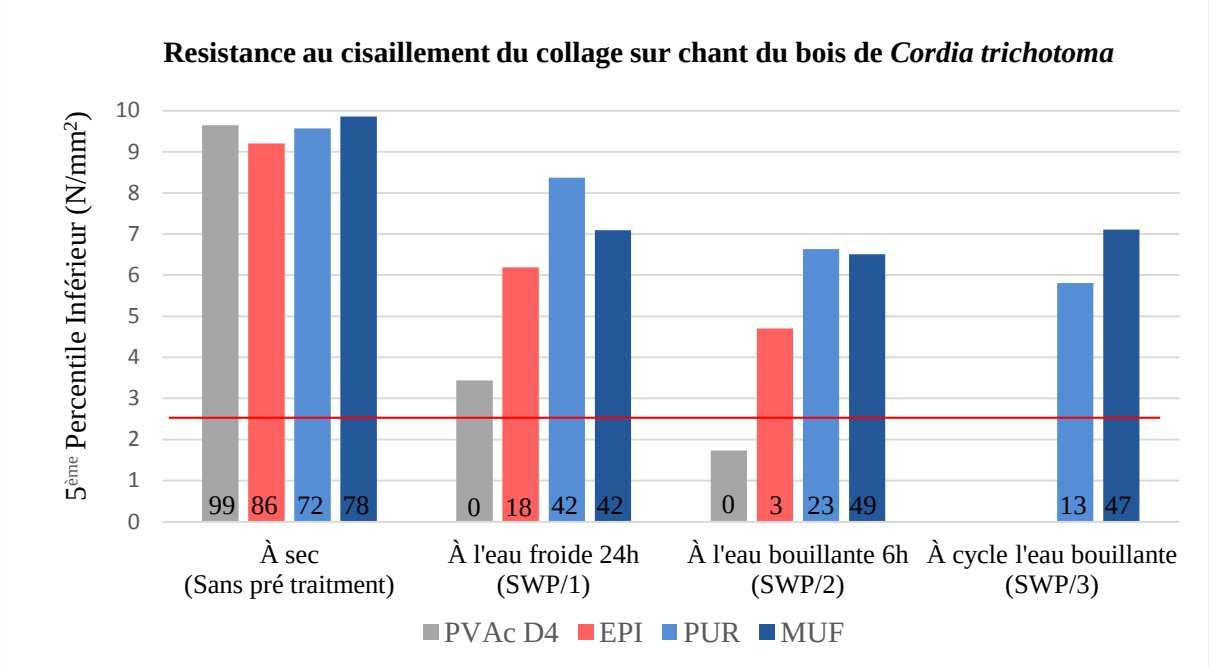
Le bois de *Cordia trichotoma* présente une densité apparente de 0,58 g/cm^3, ce qui permet de le classer comme une essence à densité moyenne, et légèrement inférieure à celle indiquée par Carvalho (2006). Les bois qui présentent une densité jusqu'à 0,70 g/cm^3 sont recommandés pour la production de panneaux EGP parce qu'ils ne nécessitent pas de préparations spéciales pour le collage et ne présentent pas non plus de réduction de résistance sur la ligne de collage (Marra, 1992).

Les résultats aux tests de résistance en flexion et en traction des entures multiples en bois de bout (finger-joint) présentent, respectivement en fonction des pré-traitements, des valeurs entre 27 et 46 MPa et entre 23 et 27 MPa. Les pourcentages de rupture cohésive apparente du bois sur lors des tests de tractions étaient entre 37% et 69%. En accord avec les exigences de résistance de la norme ASTM 5572 pour ce test, l'adhésif EPI est approuvé pour tous les pré-traitements testés.

La figure 1 présente les résultats du 5ème percentile inférieur obtenu à partir du test de résistance au cisaillement du collage sur chant.

Les résultats sur la qualité des collages sur chant du bois de *Cordia trichotoma* montrent de manière générale une haute résistance de la ligne de colle au cisaillement, atteignant dans la plus part des cas les minimums requis par la norme EN 13353 (2003). Les différences dans les résultats de résistance sont associées aux caractéristiques de chaque adhésif, l'adhésif MUF présente les meilleures performances.

Bien que les valeurs obtenues pour les 5ème percentiles inférieurs soient élevées, les valeurs de pourcentage de rupture cohésive apparente du bois présentent de faibles valeurs dans certaines conditions de collage et sont très variables, principalement pour les procédures de pré-traitement. Ce résultat peut traduire une certaine difficulté de pénétration de l'adhésif dans le bois et un ancrage mécanique insuffisant, ou encore une résistance de l'interface adhésif-bois inférieure à la résistance du bois lui-même. Des études sur les conditions de collage comme la température, la pression ou le traitement des surfaces entre autres peuvent améliorer la performance de l'adhésion.



Notes : Les barres indiquent les valeurs moyennes du 5ème percentile inférieur pour les adhésifs et pour chaque pré-traitements, calculés selon la norme EN 326-1 (1994).
— Requis minimum pour le 5ème percentile inférieur (2,5 N/mm²) - EN 13353 (2003).
Les valeurs présentées sur la base des barres indiquent le % de rupture cohésive apparente du bois.

Fig. 1: Résultats de resistance au cisallaiment du collage sur chant (5ème percentile inférieur).

Au vue de ces résultats et des pratiques de l'industrie brésilienne, les panneaux de *Cordia trichotoma* réalisés à base d'adhésif PVAc D4 sont approuvés pour un usage en conditions sèches (SWP/1 - EN 13353:2003). Les panneaux réalisés à base d'adhésifs EPI ou PU sont approuvés pour un usage en conditions sèches et humides (SWP/1 e SWP/2 - EN 13353:2003) et ceux à base de MUF sont approuvés en conditions sèches, humides et extérieures (SWP/3 - EN 13353:2003).

Conclusion

D'après les premiers résultats obtenus avec le bois de *Cordia trichotoma*, on note un potentiel de cette essence pour la production de panneaux lamellés-collés sur chants (EGP) et donc, pour la production d'autres produits de haute valeur ajoutée qui nécessitent un processus de collage dans sa fabrication, pour un usage en conditions humides ou extérieures.

Les meilleurs résultats de collage sur chants du bois de *Cordia trichotoma* ont été obtenus avec l'adhésif MUF.

Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise Bastitella Florestal pour avoir fourni le bois de *Cordia trichotoma* et le fabricant d'adhésif Akzo Nobel.

Références

ASTM 5572 (2005). Standard specification for adhesives used for finger joints in nonstructural lumber products. West Conshohocken.

Carvalho P.E.R. (2006). Espécies arbóreas brasileiras. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, v. 2, 628 p.

EN 13353 (2003). Solid wood panels (SWP) - Requirements. English Version. Brussels.

Marra A.A. (1992). Technology of wood bonding: principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 453 p.

NF EN 13354 (2009). Solid wood panels (SWP) - Bonding quality - Test method. English Version. Brussels.

NP EN 323 (2002). Placas de derivados de madeira. Determinação da massa volumica. Versão Portuguesa. Portugal.

NP EN 326-1 (1994). Wood based panels. Sampling, cutting and inspection – Part 1: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results. English Version. Brussels.

Poster A10

Caractérisation de la flexibilité et de la résistance à la fatigue d'un treillis charnière bois

BENAS Yohann[1], BOUTET Louis[1], GALLIOU Mathieu[1], MICHAUD Franck[2]

[1] Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
[2] Laboratoire Innovation Matériau Bois Habitat Apprentissage (LIMBHA), Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
franck.michaud@ecoledubois.fr

Mots clefs : treillis charnière, contreplaqué, fatigue, flexion, découpe laser.

Contexte et objectifs

A l'ère du Do It Yourself, de nombreuses technologies basées sur le numérique ont été rendues accessibles à tous. Parmi celle-ci, la découpe laser a été largement développée notamment sur le matériau bois et ses dérivées. En effet, le matériau est lui aussi très accessible. Parmi les possibilités offertes, la production de treillis charnières (« lattice hinge ») permet d'envisager de donner un ou plusieurs degrés de liberté supplémentaires aux traditionnelles panneaux ou pièces de bois. Le treillis-charnière est l'application d'une méthode de découpe d'un matériau plan et « non-élastique » lui conférant des propriétés de cintrage voire de mouvement. Il s'agit d'apporter par de nouveaux outils un développement important à des techniques plus anciennes de cintrage telle que la réalisation par « kerfing » (Crane et al, 2010). De nombreuses applications comme des objets « design » (website PINTEREST), des charnières, et même des panneaux structuraux comme le CLT (CTB, 2018) voient le jour. La principale question de cette étude est :

- En quoi les paramètres de conception influencent-ils la capacité de flexibilité (courbure) et de résistance à la fatigue du treillis charnière ?

Matériels et méthodes

Afin d'obtenir de premiers résultats il a été choisi d'aborder ce type de forme complexe de façon simplifiée. En effet, il existe une multitude voire une infinité de schémas pour un treillis permettant non simplement une flexion ou de multiples flexions mais de la torsion. La découpe simple choisie (Fig. 1 et 2), en se basant sur des essais préliminaires et les éléments bibliographiques, est constituée de fentes disposées en quinconce selon un motif répétitif dans le sens transversal de l'échantillon. Le choix du matériau a été limité à un produit standard : un contreplaqué 3 plis en peuplier (*Populus spp.*) de 5mm d'épaisseur (données technique correspondant à la fiche CTBA contreplaqué). L'objectif, comme pour le choix du motif, est de réduire le nombre de paramètres pour faciliter la compréhension du phénomène, et ce dans le but de réaliser un objet courant comme applicatif.

Le motif présente plusieurs paramètres comme le montre la figure 3. Parmi ceux-ci nous avons choisi de garder fixes :

- L'espacement transversal (C) sachant que sa réduction lors d'essais préliminaires a induit une grande fragilité de la charnière.
- L'épaisseur de la découpe en gardant l'épaisseur (0,05 mm) fournie par la machine dont nous disposons (TROTEC).
- L'épaisseur de l'échantillon est celle du contreplaqué soit 5mm.

Les paramètres non fixes sont la longueur de découpe (B) avec 3 valeurs possibles (10, 20 ou 30mm) et l'espacement longitudinal (D) qui est de 2 ou 4mm. Nous testons ainsi 6 combinaisons des deux façons suivantes :

- Un essai permettant d'estimer la courbure maximale de la charnière (Fig. 4 et 5) et une observation qualitative de sa rigidité/souplesse.
- Un essai permettant de caractériser la tenue à la fatigue de la charnière suite à des mouvements répétés (3500 cycles). Pour cet essai un dispositif expérimental a été spécifiquement développé (Fig. 6).

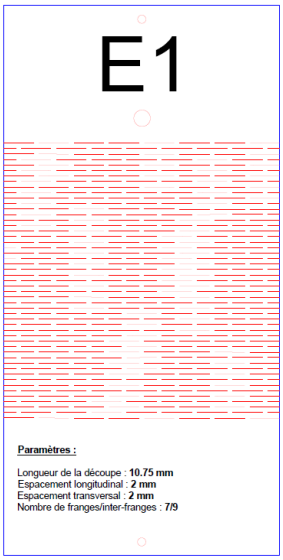


Fig. 1 : Motif simple avec B=10 et D=4

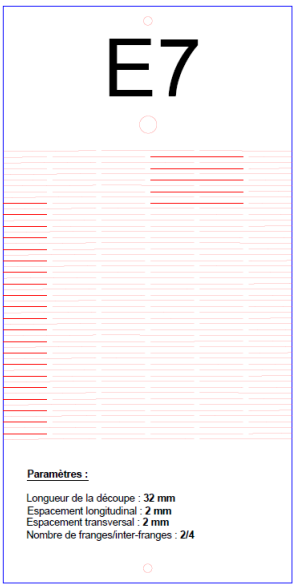


Fig. 2 : Motif simple avec B=30 et D=2

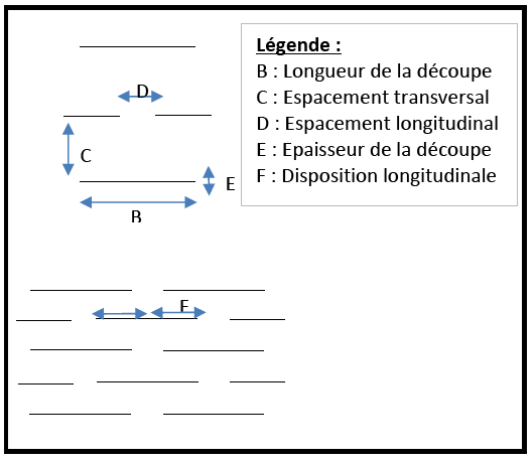


Fig. 3 : Paramètres du motif de découpe du treillis charnière

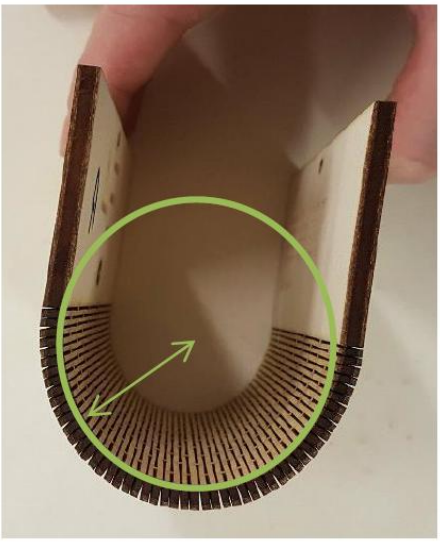


Fig. 4 : Courbure pour une faible contrainte

Fig. 5 : Courbure maximale

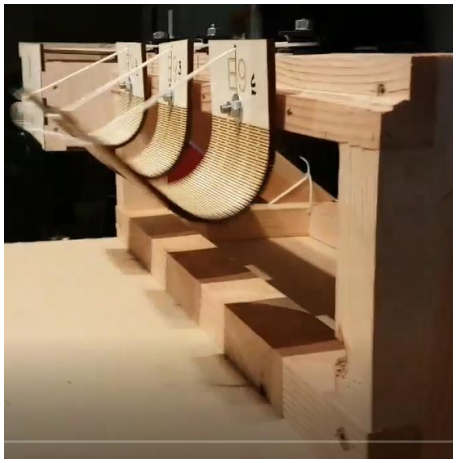


Fig. 6 :Dispositif expérimental de test de fatigue en flexion

Résultats et discussion

Les résultats des observations sur les tests de courbure (Tab. 1) montrent que la longueur de la découpe (B) a une influence majeure sur le comportement de la charnière. Le tableau permet de comparer et d'analyser les différentes valeurs et de conclure sur les paramètres à employer pour une situation et un emploi précis de cette technique. Avec pour critère principal la flexion de l'échantillon à 180°, on remarque que la souplesse du treillis est induite par les paramètres de découpe. Les paramètres d'espacement transversal et longitudinal sont importants pour caractériser le comportement de cintrage de l'échantillon.

Le nombre de frange (ou nombre de partie bois sur une même ligne de découpe) influe aussi fortement sur la souplesse du treillis. Lors des observations une caractérisation qualitative de la rigidité a été faite selon une échelle allant de 0 à 10 soit d'une impossibilité de mouvement à une mobilité totale du système. Chaque frange apporte une résistance et peut être vu comme un élément de type ressort. Il existe donc un équilibre entre frange et découpe, les premiers résultats montrent qu'il est favorable de minimiser le nombre/la taille des frange dans notre cas.

Echantillons		Paramètres				Observations				Test					Analyse				
Identification	N° d'échantillon	Longueur de la découpe (mm)	Espacement longitudinal (mm)	Espacement transversal (mm)	Nombre de franges/ Interfranges	Rigidité	Angle de déplacement	Rayon de courbure (mm en fonction de l'angle)	Rayon de courbure maximum (mm sous contrainte)	Nombre de cycle	Nombre de série	Validité de l'essais	Déformations plastiques (mm pour 100mm)	Commentaires	Moyenne Rc (mm)	Ecart type	Moyenne Rmax (mm)	Ecart type	Moyenne des cycles
1	A	10,75	2	2	7;8	2	< 90	63	46	2691	1	Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)	63	0,58	46	1	2689
	B							64	47	2654		Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)					
	C							63	45	2723		Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)					
3	A	10,86	4	2	6;7	3	< 90	61	48	2952		Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)	60	0,58	48	1	2963
	B							60	47	2967		Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)					
	C							60	49	2971		Non	X	Rupture en test (nombre de cycle)					
4	A	18,4	2	2	4;5	5	180	22	15	3500		Oui	5	X	22	1	15	0,58	x
	B							23	16	3500		Oui	7	Rupture au milieu suite à un essai de courbure maximum (contrainte trop élevé)					
	C							21	15	3500		Oui	6	X					
6	A	22	4	2	3;4	6	180	25	16	3500		Oui	5	X	25	1,53	15	2,08	x
	B							24	17	3500		Oui	6	X					
	C							27	13	3500		Oui	6	X					
7	A	32	2	2	2;3	9	180	24	14	3500		Oui	4	X	25	1	14	1	x
	B							26	15	3500		Oui	2	Rupture au milieu suite à un essai de courbure maximum (contrainte trop élevé)					
	C							25	13	3500		Oui	3	X					
9	A	30,67	4	2	2;3	8	180	30	15	> 3500		Oui	5	X	30	0,58	15	1	x
	B							31	14	> 3500		Oui	11	X					
	C							30	16	> 3500		Oui	6	X					

Tab. 1 : Résultats des observations de courbure et des tests de fatigue en flexion sur 6 combinaisons différentes de treillis charnière en contreplaqué (3 répétitions par combinaison)

Les échantillons de configuration 9 (Tab 1.) représentent la meilleure solution de notre étude puisqu'il supporte le maximum de cycles (>3500) et présente une courbure maximale. La configuration 6 répond elle aussi bien aux tests en gardant une plus grande rigidité. Fort de ces résultats un premier prototype de boitier à lunettes a été réalisé en choisissant une rigidité inférieure à la force des aimants en charge de maintenir la boite en position fermée et une configuration permettant un usage fréquent de la charnière (Fig. 7).

Fig. 7 : Prototype de boite à lunettes en treillis charnière contreplaqué

Conclusion

En conclusion nous pouvons dire que les paramètres qui influent le plus sur la souplesse et le rayon de courbure sont la longueur des espacements transversaux et longitudinaux ainsi que le nombre de franges. En effet, la longueur de la découpe découle de la largeur de l'échantillon et des autres paramètres cités précédemment.

Ce projet sur l'étude d'un motif bien précis, permettant de plier seulement autour d'un axe de rotation, nous a permis de mieux comprendre comment fonctionne le treillis charnière. Il serait donc intéressant d'affiner l'étude des paramètres et de passer sur une échelle beaucoup plus grande que du contreplaqué (par exemple du CLT) pour réaliser non pas un objet mais une structure en même temps fonctionnelle et décorative.

Remerciements

Travail réalisé dans le cadre d'un projet d'étudiants (Benas et al, 2017) de seconde année de la formation ingénieur de l'Ecole Supérieure du Bois avec l'appui technique de MM. S.RINCÉ et D.LAFFITE.

Références

BENAS et al (2017) Etude de la flexibilité et de la résistance d'un treillis charnière bois. Rapport final projet PRTT, 22pages, Ecole Supérieure du Bois.

CRANE et al (2010) Kerf-based complex wood systems, Performative Wood Studio, Harvard University Graduate School of Design, (http://www.achimmenges.net/?p=5006) .

CTB (2018) https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/quels-clt-pour-demain.36226.

Poster A11

Correlation between colour change and moisture content of naturally weathered wood surfaces

RIBAS LEÃO Amanda[1], BUCHNER Julia[2], IRLE Mark[2]

[1] Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil
[2] Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
amanda.ribasleao@etu.ecoledubois.fr

Key words: Wood weathering; biotic factors; oak; Douglas fir; colour measurement; moisture content;

Context

Within a larger research project the impact of abiotic factors such as UV-light, rain, and temperature as well as the influence of microorganisms such as fungi and bacteria during natural weathering over several years on oak (*Quercus robur*) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziensii*), are going to be studied. In behalf of the experiment, the samples will be exposed outdoors and must be facing south (EN 927-3 2018) in a location where walls will not cover any climate factor, such as blocking the wind, rain or sun. For the proper simulation of a façade, the samples must be aligned so that the grain runs horizontally and the exposed face makes an angle of 90 ° to the ground. The objectives of the experiment are:

- Evaluate the colour change along the time of exposure
- Compare the visual degradation of the wood surfaces over the two years by scanning
- Check microscopic changes using an environmental scanning electron microscope
- Examine the chemical changes of the wood samples with ATR analysis
- Assess the biotic factors that occur during the wood weathering

For the visual analysis and the colour measurements there are 10 replicates for each species that will be continuously measured in order to follow the evolution of the colour change. The samples must be collected every stipulated date and be returned outside as soon as possible after measuring. This implies that the colour measurements are likely to be made when the sample faces have strongly divergent humidity levels. It is known that moisture content influences wood colour (Yeo et al., 2002). Consequently, an experiment was carried out to determine how colour changes with surface moisture content of oak and Douglas fir wood. If the correlation of these factors is strong enough, then it should be possible to correct the colour data to a standard moisture content.

Materials and Methods

Five samples of oak and Douglas fir were cut with a circular saw into 100 x 65 x 10 mm (longitudinal x tangential x radial) samples and conditioned for five days in (65 ±5) % humidity at (20 ±2) °C before testing. For this project only heartwood is considered. The samples were defect free, i.e., no knots or resin pockets.

On each sample, three moisture content readings and six colour measurements were performed. Specific areas were marked on the tangential face of the sample, so the measurements were always taken in the same area.

The samples were wetted with sterile water with a sponge, so there would not be excess of liquid on the surface. Forthwith, the moisture content was measured with the moisture meter

Logica LG6NG, followed by colour measurements with the spectrophotometer X-rite Ci64. The samples were used to collect data five times, meaning that the samples were wetted five times, in total 150 colour measurements and 75 moisture readings were done.

All data were saved in excel spreadsheets and then organised in groups by the moisture content in steps of 10 % , i.e. <10 %, >10 to <20 % and so on. The oak species had five groups from 10 to 50 %, however Douglas had one more, going up to 60 %.

Results and Discussion

With the L*a*b* results obtained (see Fig. *1* and Fig. *2*) it is possible to notice that oak wood gets darker from the natural light brown as the moisture content rises, however the darkest point is in the group 30-40 %. The R^2 values indicate that the correlations are reasonable for the a* and b* values, but, rather poor for the L value for both species; although all correlations are statistically significant.

The colour change of oak was not as great as that seen for Douglas fir. As stablished in the table created by Hikita et al. (2001, mentioned by Griebeler, 2013), the total variation in Oaks colour is considered appreciable (between 3 and 6) and Douglas is very appreciable (range between 6 and 12). Both luminosities dropped about 3 %, while the factors a* and b* increased 13,7 % and 10,7 %, respectively for oak and in comparison, the changes in Douglas fir were more significant, a* increased by 20.0 % and b* 22,1 %.

The fact that the highest moisture content for oak is not the same for Douglas fir may appear to be an uneven comparison but even if the results are from the same moisture content group they show that Douglas still changes more than oak.

It is remarkable that the indices a* and b* have opposite behaviour to the index L* when they increase, L* decreases. This indicates that when wet, both species tend to become darker in relation black/white and more red and yellow.

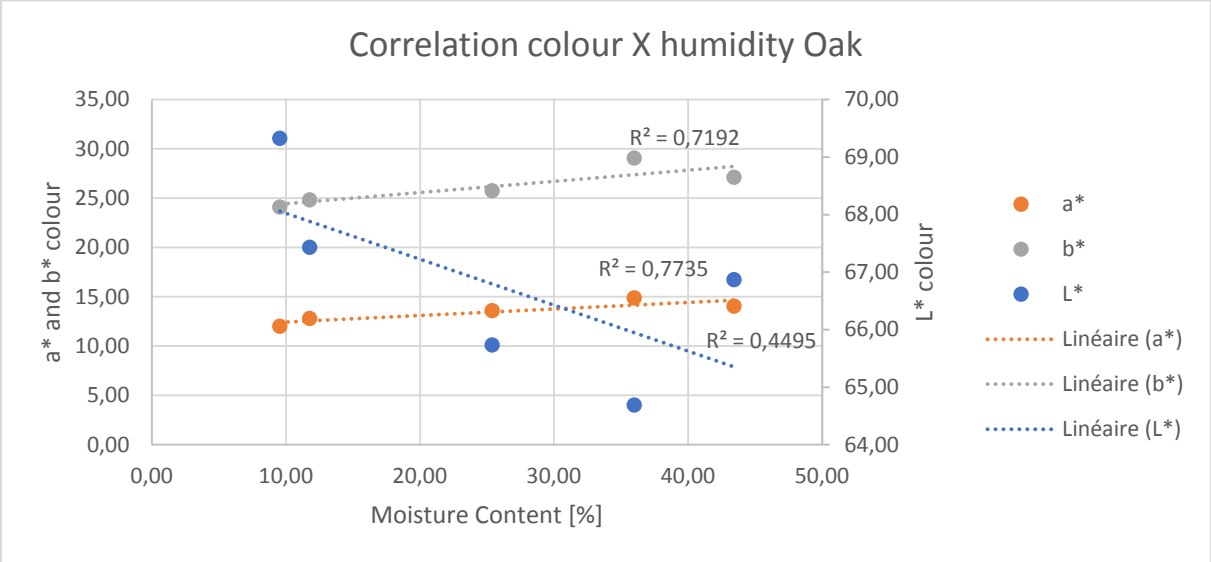


Fig. 1 - Correlation graphic between colour and moisture content for Oak measurements with linear trend curves.

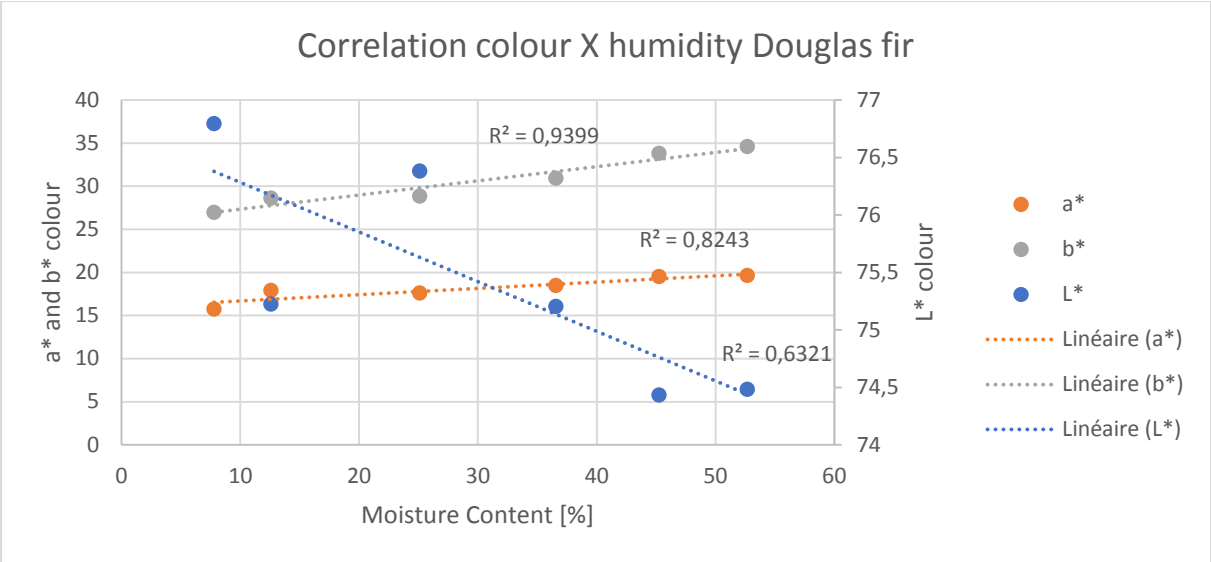


Fig. 2 - Correlation graphic between colour and moisture content for Douglas measurements with linear trend curves.

These results show the importance of measuring moisture content during an outdoor weathering test. Consequently, in the large experiment mentioned at the start of this paper, one sample of each wood species will be continuously measured with the Thermofox from Scanntronik GmbH for moisture content. Insulated screw pins will be installed in different depths of the sample so as to measure the moisture gradient in the wood samples.

Conclusions

The data indicate that there is a linear correlation between the wood colour and its surface moisture content. Therefore, it is necessary to measure surface moisture content when colour measurements are made.

Acknowledgments

The author thanks the Group ESB and CAPES Foundation, Ministry of Education of Brazil, Brasilia - DF, Zip Code 70.040-020.

References

EN 927-3 (2018) Paints and varnishes- Coating materials and coating systems for exterior wood- Part 3: Natural weathering test. European Committee for Standardization

Griebeler, Carolina Gomes de Oliveira. Calorimetria da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden modificada termicamente. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, March 1st, 2013. 66p.

Yeo, H., Smith, W.B. and Hanna, R.B. (2002). Determination of surface moisture content of wood utilizing a colorimetric technique. Wood And Fiber Science 34(3):419-24.

Poster A12

Modélisation élastique de robots en bois : adaptation de la théorie des poutres

BOUDAUD Clément[1], KACI Lila[2], BRIOT Sébastien[3], MARTINET Philippe[4]

[1]LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois, Nantes,
[2]LS2N, Ecole Centrale Nantes,
[3]LS2N, CNRS,
[4]INRIA, Sophia Antipolis Méditerranée.
clement.boudaud@ecoledubois.fr

Mots clefs : modélisation élastique de robot ; bois acétylé ; théorie des poutres

Contexte et objectifs

En robotique, les modèles élastiques doivent fournir une estimation précise de la déformation sous charge et des fréquences propres tout en maintenant un temps de calcul très court : soit pour être répété des milliers de fois dans une boucle d'optimisation (conception) soit en temps réel dans une boucle d'asservissement (contrôle).

On cherche à développer un modèle élastique pour le robot étudié dans le cadre du projet RobEcolo (2015). Il sera réalisé en bois acétylé avec des bras d'environ 30 cm de longueur. L'objectif est de prévoir la déformation statique sous charge de l'effecteur (dans les 3 directions de l'espace) et la fréquence fondamentale avec moins de 10% d'erreur, tout en maintenant un temps de calcul inférieur à 0,1 sec (pour un PC standard).

Méthode

Le module d'élasticité longitudinal du bois acétylé n'est pas connu avec suffisamment de précision, que ce soit parce que les données existantes ne sont que des valeurs moyennes ou parce-que les effets d'échelles du matériau ne permettent pas d'extrapoler pour les dimensions des bras de robot. La première étape consiste à caractériser la rigidité du pin et du hêtre acétylé afin d'en déduire la loi de probabilité et les paramètres les mieux adaptés.

Ensuite, le principe général est de commencer par un modèle le plus simple possible et de le compléter lorsque nécessaire afin prendre en compte des phénomènes additionnels. Le point de départ est la théorie des poutres (Euler-Bernoulli) implémentée dans MatLab. Dans la réalité, les liaisons pivots sont assurées par des axes métalliques de 20 mm de diamètres, eux-mêmes insérés dans des bagues en bronze (emmanchées en force dans les bras en bois). Une étude préalable avait montré que modéliser ces assemblages par des liaisons parfaites était très largement faux (Num 1 sur la Fig.4).

La problématique consiste donc à prendre en compte la rigidité de ces assemblages. Pour revenir aux bases du comportement du système, le premier cas étudié expérimentalement et numériquement est celui d'un bras seul. Les cas de deux bras et d'un robot complet sont ensuite étudiés.

Résultats

Le premier résultat est que le module d'élasticité du bois acétylé suit une loi normale, ce qui est cohérent avec les recommandations de l'EN 14358 (pour du bois de structure). Les valeurs de moyennes et d'écarts types servent au reste de l'étude.

En étudiant successivement les cas d'un bras seul (Fig. 1 et 2), de deux bras puis de quatre, il est montré qu'un coefficient de réduction de la rigidité du bras peut être estimé à partir d'une loi linéaire (le coef dépend de la rigidité du bois). Cette loi peut être obtenue à partir de 4 essais expérimentaux (Fig. 3) en comparant la rigidité du bras à la rigidité apparente de l'ensemble assemblage/bras. Il est alors possible de prédire le comportement pour toute valeur initiale de rigidité des bras en bois (Fig. 4).

Fig. 1 : Specimen (1 bras)

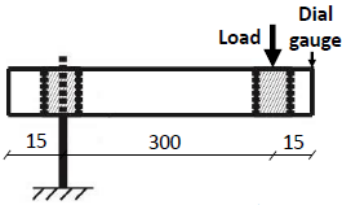


Fig. 2 : Principe de l'essai statique (1 bras)

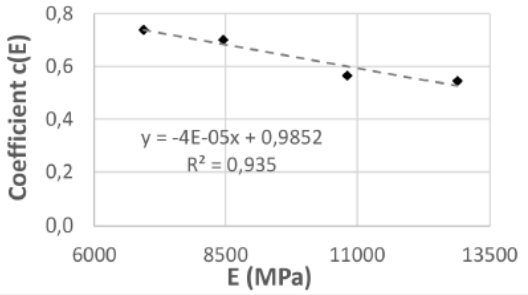


Fig. 3 : Calibration de la loi à partir de 4 essais (1 bras)

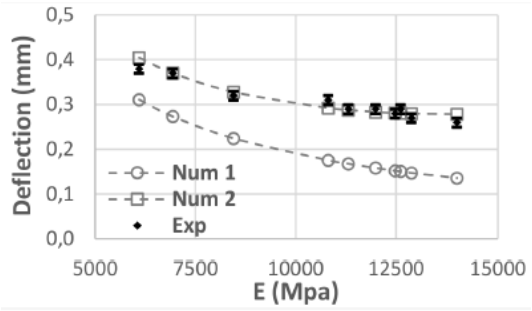


Fig. 4 : Vérification du modèle (Num 2) sur 10 essais (1 bras)

Cette approche présente une difficulté évidente : des essais expérimentaux sont nécessaires pour définir le modèle et chaque changement de géométrie de liaison demandera des essais supplémentaires. Néanmoins en première approche, cela permet d'avancer dans le cadre du projet RobEcolo. En effet, en utilisant la rigidité « apparente » estimée à partir de la loi, les prédictions des déformations et fréquences fondamentales (mesurées par Bing) des maquettes de robot sont entre 6,2 et 9,3 % d'écarts moyen pour des temps de calcul de 0,042 sec en statique et 0,09 sec en dynamique.

La perspective principale est de développer des modèles numériques plus détaillés des assemblages pour prédire leur rigidité plutôt que de le faire expérimentalement. D'autres thématiques liées aux variations dimensionnelles ou au fluage (de pièces en mouvement) pourraient apparaître.

Remerciements

Le projet est financé par la région Pays de la Loire (convention No. 2018-10773). L'aide matérielle de Accsys Group est aussi reconnue.

Références

RobEcolo (2015) http://robecolo.irccyn.ec-nantes.fr/

Poster A13

MDF waste: A feedstock for small sized-biorefineries?

VELEZ Guillermo[1], IRLE Mark[1], BELLONCLE Christophe[1]
LAHAYE Marc[2], BONNIN Estelle[2]

[1]Ecole Supérieure du Bois, Nantes, France
[2]INRA, Paroi Végétale et Polysaccharides Pariétaux (PVPP), Nantes, France
Guillermo.Velez@ecoledubois.fr

Mots clefs: Biomass, biorefinery, recycling, MDF waste

Abstract

Urban and peri-urban biomass wastes like crop-residues, landscaping and post-consumer wood are currently disposed as an energy source, or compost material. One alternative is the transformation into high value products in a small sized-biorefinery. A European consortium named Flexibi was set up to study the feasibility of such process. The biomolecules obtained would be used as basic or intermediate ingredients in agricultural or chemical industries. A decision support tool, suitable to design and predict an efficient and sustainable bioprocess, will be created, using both modelling and experimental approaches. The experimental approach will be based on the use of chemical and enzymatic techniques that allow to convert the biomass material into value added-products. This paper will focus on the first step of the project, the processability of MDF waste, in combination with other lignocellulosic wastes through biorefinery pathway.

Context and objectives

In the 80's, it was conceived by the western economies that society needed to recycle post-consumer wood products, otherwise the material demand would be unsustainable. Nevertheless this policy has become effective, there are not many other recycling methods for wood wastes, than uses as basic energy fuels. Certainly, this is not an appropriate solution for waste management, since some type of wood wastes, especially when preservative or adhesives are present, have higher emissions than the ones from fossil fuel, 126 % in the worst scenario (Röeder, 2018). This represents extra costs for manufacturers and product users. Lately, governments and industries are putting more efforts on finding new alternatives to treat post-consumer wastes. Particular interest has been given to MDF waste, due to the amount produced a year (more than 50 million m^3 was produced in 2016 according to Irle et al. (2017), this value increasing due to the high demand of this type of product. Research carried out on MDF wastes by Chaharmahali et al. (2008) and Vanreppelen et al. (2011) produced high value materials such as highly activated carbon and wood plastic composites. More recently Couret et al (2017) and Gu et al. (2017) showed that it is possible to obtain cellulose nanocrystals (CNC) from MDF wastes, with respective yields of 13 and 27% from the starting material. Moreover, properties of this nanocomposite were similar to the CNCs obtained from virgin wood material. The high price of this type of nanocrystal ($1000/kg with 8 % concentration (Irle, 2018) and the need to reduce the amount of wastes in urban areas, made processing and recovery of valuable products from MDF waste a promissory alternative. Therefore, highly interest it is given to identify new routes through experimental approaches that can make more efficient and sustainable the recovery of chemical compounds from this particular waste.

Flexibi project encourages the use of different type of plant biowastes materials, from urban, peri-urban zones, which comprises the mixing of several agricultural, landscaping and agro-industrial residues with MDF wastes, which can be treated through a flexible biorefinery process. This approach might be interesting and synergistically convenient, since one of the many difficulties with the processing of many agricultural wastes is their very high moisture content, whereas in MDF is relatively low (less than 16% on a dry basis). Combining these lignocelulosic wastes would facilitate the processing of the mixture and also their storage for longer periods, rather than being treated separately.

To determine the most suitable way to treat the mixture of the different feedstocks it is important to characterize each material individually to identify their chemical composition and physical properties to define a pathway that can integrate all the wastes, considering the amounts generated during seasons and the products to obtain. Among the several biomaterials that can be obtained in a biorefinery, this project will mainly focus in the recovery of three type of products nanocellulose, oligosaccharides and lignin. The first types might be used as emulsion stabilizer, or as additives on paper materials and composites and the last might be used as a source of materials for composites or active molecules.

Material and Method

At least 10 different representative feedstocks from the groups will be characterised:

• Crop by-products and residues generated along the chain from agriculture to processing

• Woody landscaping and garden residues

• Post-consumer waste wood

For the promising bioresources, analytical data will be collected on the samples set in order to confirm their suitability and to fully characterise the resources. The variation in physico-chemical properties obtain after homogenization, which will principally involve mechanical disintegration, will be measured. Critical properties to be measured will include:

moisture content (MC), pH, buffer capacity, particle size distribution, mineral content, phenolic compound content, carbohydrate composition, lignin content, inorganic contaminants, elemental analysis and calorific value.

Post consumer wood can contain contaminants which, including rather innocuous contaminants like adhesives, finishes and metal fixings, but also, depending of the provenance could include pesticide, fungicide or fire-retardant treatments. Their presence will be characterized by XRF, GC-MS and NIR spectroscopy.

Finally the chemical composition (cellulose, hemicellulose, lignin,..) will be determined as these will ultimately define the maximum possible yields of high-value products

Expected Results

Results will allow to evaluate a suitable and convenient form to incorporate the waste material to other biomass materials in order to obtain an appropriate mixture balance for processing and to reduce the variability of the process in comparison to treat each waste individually. Also, a suitable balance between different waste materials needs to be achieved to ensure permanent supply of materials due to the seasonal constrains for some plant materials. Based on this, a biorefinery pathway than involves a biochemical transformation will be further studied to determine the most sustainable route to process local and regional wastes. The results of the experimentation will be used to design a modelling tool that allows to simulate

different production scenarios in terms of feedstock ratio, type of process, product demand and yield. In this way it will be more efficient and precise to decide the main features and characteristics that a small biorefinery might have for processing certain mixture of plant wastes produced locally or in a region through the year.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the Agence Nationale de la Recherche (ANR) [grant number ANR-17-FASU-0002], under the FACCE SURPLUS research programme who funded the FLEXIBI project.

References

Couret L., Irle, M., Belloncle C., Cathala B., (2017) Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from post-consumer wood fiberboard waste, Cellulose, 24, 2125-2137.

Chaharmali M., Tajvidi M., &Najafi S.K., (2008) Mechanical properties of wood plastic composite panels made from waste fibreboard and particleboard, Polymer composites, 29 (6), 606-610

Irle M., Privat F., Couret, L., Belloncle C., Déroubaix, G., Bonnin, E., Cathala B., (2018) Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF, Wood material science & engineering of solid wood. PRO LIGNO, 11(4), 14–20.

Gu J., Chuanshuang, H., Rui, Z., Dengyun, T., Hong Y., Weiwei, Z., Shao-Yuan L., (2017) Isolation of cellulose nanocrystals from medium density fiberboards, Carbohydrate polymers, 167, 70-78

Röder M., Thornley P., (2017) Waste wood as bioenergy feedstock. Climate change impacts and related emission uncertainties from waste wood based energy systems in UK, Waste management, 74, 241-252.

Vanreppelen K., Kuppens, T., Thewys, T., Carleer, R., Yperman, J., Schreurs, S., (2011) Activated carbon from co-pyrolysis of particle board and melamine (urea) formaldehyde resin: a techno-economic evaluation, Chemical engineering journal, 172(2-3), 835-846

Poster A14

Conception et expérimentation d'un programme d'innovation collaborative pour les industries de la filière bois.

BLANCHARD Philippe[1], CHEOUR-EON Manel[2]

[1]Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
[2]Groupe ISB, Pacé, France
philippe.blanchard@ecoledubois.fr

Mots clefs : innovation ; collaboration ; processus ; WIT ; industrie ; filière bois

Contexte et objectifs

L'Ecole Supérieure du Bois (ESB) a pour mission, entre autres, de faciliter une démarche d'innovation au sein des entreprises de la filière bois. Son équipe de recherche développe et teste des outils d'aide à la conception innovante (Triz, InnoBook).

Elle souhaite élaborer une démarche collaborative reposant sur les principes de l'intelligence collective. Deux principaux objectifs sont poursuivis :

• Réunir des compétences, affirmées mais diverses, au cœur d'un processus d'élaboration et de test de propositions innovantes pour les industriels du secteur bois.

• Construire et expérimenter une démarche allant de l'émergence de concepts novateurs vers leur concrétisation et leur validation par l'usage.

Modélisation

L'innovation va apparaître dès lors que les solutions évidentes, traditionnelles, banales seront écartées. Or, inconsciemment, elles sont très ancrées à notre esprit. La difficulté de la pratique de l'innovation est d'être capable de s'en affranchir. Il faut, non seulement se débarrasser du connu, mais s'engager dans le flou, l'incertitude et la complexité.

De nombreux auteurs ont cherché à modéliser le processus d'innovation. L'équipe de recherche a regroupé les principaux modèles dans le schéma ci-après (Fig. 1) où se produit une alternance de *divergences* (ouvrir le champ des possibles) et de *convergences* (se concentrer sur les propositions viables).

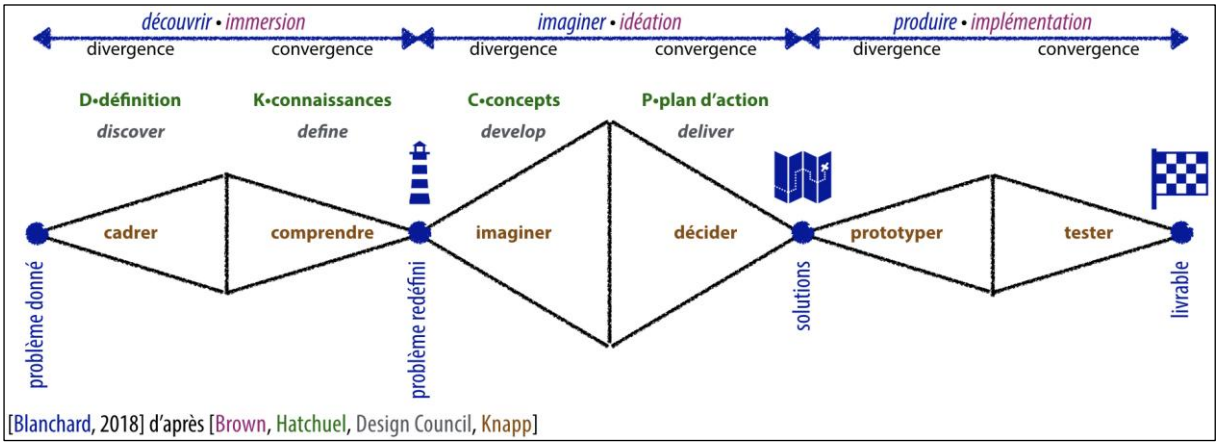


Fig. 1 : Conjonction de différentes approches du processus d'innovation (Blanchard, 2018).

IDEO et Tim Brown (Brown, 2008) initiateurs du *design thinking*, introduisent les 3 étapes suivantes : *immersion* (ou inspiration), *idéation* et *implémentation*. Le processus commence par la demande d'un donneur d'ordre jusqu'à la livraison finale du produit ou processus.

La théorie C-K (Hatchuel et al., 2009) propose la notion de DKCP : D pour définition, K pour *knowledge* (base de connaissances), C pour concepts et P pour proposition d'un plan d'actions. Cela ne couvre que les 2 premiers temps du *design thinking*.

Le Design Council (2007) a popularisé le modèle du *double diamant*. Lui aussi ne reprend que les 2 premiers temps : *Discover* et *Define*, *Develop* et *Deliver*. Attention au risque de confusion des termes : le "Définir" du DKCP concerne le contexte du problème alors que le "Define" du Design Council porte sur la problématique reformulée. Le "Deliver" du *double diamant* concerne le concept à retenir alors que le véritable livrable (concrétisé) n'intervient qu'à la fin du 3ème temps.

Le Design Sprint, méthode de plus en plus en vogue (Knapp, 2016), prend en compte les 3 temps du *design thinking* : *cadrer* et *comprendre*, *imaginer* et *décider*, *prototyper* et *tester*. Non seulement la solution est réalisée mais elle est testée auprès des futurs utilisateurs.

Bien que ces modèles semblent linéaires, il est judicieux de les considérer comme itératifs et cycliques. La représentation rectiligne se transforme en une roue, préfigurant le modèle de "boussole de l'innovation" (Blanchard, 2017). Une fois la dernière étape atteinte, l'arrivée peut coïncider avec un nouveau parcours en 3 temps :

• Découvrir (ou immersion) : se donner un objectif ambitieux (un *phare*),

• Imaginer (ou idéation) : apporter des réponses innovantes mais crédibles (un *roadbook*),

• Fabriquer (ou implémentation) : construire et tester des prototypes fonctionnels (un *livrable*).

Pour déployer ce modèle, un programme d'innovation collaborative (un workshop dédié) a été élaboré. Dénommé WIT (Wood It Together), il réunit 3 domaines de compétences :

• l'industriel : initiateur du problème à résoudre, il est expert du contexte concerné,

• les chercheurs : promoteurs de la démarche, ils facilitent l'usage de la méthodologie choisie,

• les étudiants : ressource inépuisable de créativité, ils constituent de vrais puits d'énergie.

La mise en œuvre du WIT se déroule sur 4 jours (Fig. 2) dans un lieu spécialement conçu (Espace Créatif).

Le début du temps "Découvrir" se situe, idéalement, sur le site de l'industriel où celui-ci peut exposer et illustrer sa problématique. Le reste du programme (la fin du temps "Découvrir", puis les 2 autres temps "Imaginer" et "Produire") est relocalisé à l'ESB à proximité immédiate de l'Espace Créatif et des moyens de prototypage.

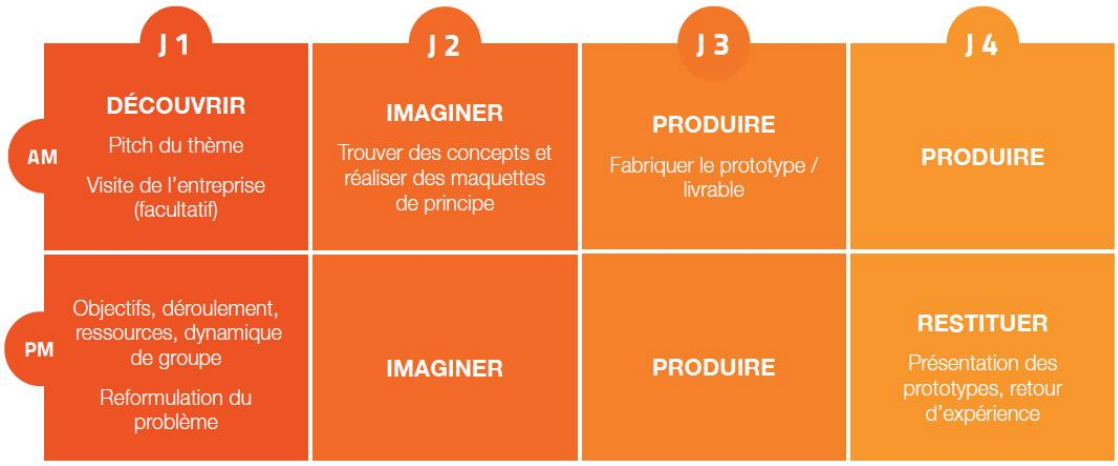


Fig. 2 : Progression du WIT-pilote selon les 3 temps forts (Découvrir, Imaginer, Produire).

Matériel et méthodes

Pour s'assurer de l'adéquation du modèle théorique (le WIT) avec les usages dans l'industrie, le test en vraie grandeur d'un WIT-pilote a été programmé. Le Groupe ISB est un spécialiste du trading et de la transformation du bois, en Europe, répondant aux futurs enjeux de la construction. Il est résolument tourné vers une stratégie de développement innovant et s'est immédiatement associé à cette expérimentation. Ce WIT-pilote s'est déroulé du lundi 19 février au jeudi 22 février 2018. Un collectif de 20 personnes a été composé de 4 salariés du Groupe ISB (des secteurs marketing, R&D, développement et production), de 4 enseignants-chercheurs de l'ESB (des domaines innovation, recherche, prototypage) et de 12 étudiants (de 1ère et de 3ème année). Le sujet a été donné par le Groupe ISB et il a été exposé sur le site industriel le lundi matin. La problématique à explorer concerne "la vêture extérieure de demain" pour les constructions collectives et les établissements recevant du public. L'objectif est d'imaginer les fonctions nouvelles, innovantes de la vêture pour apporter des réponses au plus près des besoins des clients et du marché. Le premier critère de validation de l'efficacité du WIT sera émis par l'industriel lui-même : dans quelle mesure ce processus innovant lui aura été profitable ? L'ESB s'attachera à vérifier le bon fonctionnement inter-individuel ainsi que la production d'idées exploitables. Les étudiants apprécieront la mise en œuvre d'un véritable programme d'innovation industrielle.

Résultats et discussion

Un moyen simple d'approcher l'efficacité du WIT consiste à comparer les valeurs attendues et finalement obtenues de plusieurs indicateurs. Lors de la préparation du WIT-pilote, l'examen attentif d'autres opérations d'innovation collaborative (type hackathon) a conduit à fixer une valeur objective à ces indicateurs. Le nombre d'équipes est fixé à 4. Un minimum de 3 phares identifiés par équipe est souhaité. Une production de 3 pistes par phare est attendue. Et la fabrication d'au moins un prototype fonctionnel par équipe est exigé. Le tableau suivant (Tab. 1) relève les valeurs obtenues en fin de WIT en regard des objectifs attendus.

Tab. 1 : Comparatif entre l'objectif visé et les résultats obtenus

WIT ISB	équipes	phares	pistes envisagées	prototypes
objectif	4	12	36	4
réalisé	4 regroupées en 1	16	56	12

Le WIT-pilote a été particulièrement fécond. Les 4 équipes, au lieu de jouer la compétition, ont décidé de s'unir pour offrir un résultat plus riche. Au lieu de concourir les unes contre les autres pour devenir *la gagnante*, elles ont décidé de travailler en synergie pour être *toutes gagnantes, ensemble*. Notons que l'écart de valeurs présenté par le tableau ne préjuge pas de la qualité intrinsèque de chaque item. Par contre, le retour du Groupe ISB très élogieux sur la variété des réponses et le réalisme des maquettes, confirme le succès du programme. Il souhaite également adopter ce type d'animation, en interne, pour leurs propres développements. À côté de ces points tangibles, ce WIT-pilote aura été une occasion mutuelle de partager des références d'experts (constitution de carnets d'adresses).

Des compléments d'aménagements à réaliser dans l'Espace Créatif ont été identifiés et une plus grande lisibilité de la méthodologie générale reste à perfectionner.

Conclusion et perspectives

Finalement, le bilan de cette expérimentation se résume ainsi :

• l'industriel-pilote (Groupe ISB) est satisfait et décide de renouveler annuellement l'opération,

• les étudiants sont enchantés de cette initiation à l'innovation collaborative,

• les chercheurs sont confirmés dans l'élaboration d'un processus innovant collaboratif.

Le concept de WIT est validé et son déploiement va se faire progressivement (jusqu'à atteindre une opération tous les 2 mois).

Références

Blanchard, Ph. et al. (2017) Modelling Industrial Design Contribution to Innovative Product or Service Design Process in a Highly Constrained Environment, in TRIZ – The Theory of Inventive Problem Solving, Springer, 63-83.

Brown, T. (2008) Design Thinking, Harvard Business Review, June 2008, 84-92.

Design Council (2007) A study of the design process, 144 pages.

Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B. (2009) Design Theory and Collective Creativity : a theoretical framework to evaluate KCP process, ICED 2009, Standford University, 12 pages.

Knapp, J. (2016) Sprint : How to Solve Big Problems and Test New Ideas in Just Five Days, Simon & Schuster, 288 pages.

Poster A15

Réseaux de collaboration et valorisation des ressources locales en bois dans le secteur de la construction : évaluation du potentiel de développement de la filière bois wallonne par les proximités

MUYTJENS Lionel[1],

[1]Université de Liège - Gembloux
lionel.muytjens@outlook.com

Mots clefs : Filière bois ; Wallonie ; proximité ; collaboration ; circuit court ; construction

Contexte et objectifs

Les circuits courts, et plus généralement les modes de consommation plus durables, semblent être en plein redéveloppement. Ceux-ci peuvent prendre une multitude de formes et se développer au sein de différents secteurs d'activités, comme par exemple la filière forêt-bois wallonne. Alors que les bienfaits économiques, écologiques et sociaux de ce type de modèle ont été démontrés par de nombreuses études pour le secteur alimentaire, un nombre plus réduit d'auteurs se sont intéressés au secteur du bois. Pourtant, appliquer une démarche « circuit court » aux entreprises de la filière bois semble une voie prometteuse si l'on tient compte, entre autres, de son potentiel de création d'emplois locaux, de stockage de carbone et de préservation des savoir-faire. Dès lors, la question de savoir comment cette démarche circuit court peut être mise en place et participer à la redynamisation du secteur bois se pose. Logiquement, son succès semble reposer sur la capacité de la filière à mobiliser et promouvoir ses ressources : la forêt wallonne, l'outil de production existant et le savoir-faire des entreprises existantes. Le développement de collaborations privilégiées parait donc être un élément clé pour assurer une mobilisation efficace et efficiente des ressources. Plus spécifiquement, ce travail s'est intéressé aux débouchés liés au secteur de la construction en considérant quatre corps de métier distincts : le sciage, la vente de bois (grossiste et négoces), la construction (entreprises de construction bois, menuisiers en bâtiment, charpentiers, etc.) et la conception de bâtiments (architectes et bureaux d'études).

Pour mieux correspondre à la réalité de la filière bois wallonne, la notion de circuit court mobilisée dans cette étude a été élargie aux relations économiques pouvant mobiliser plus d'un intermédiaire, mais ayant lieu à l'échelle locale au sein d'un territoire défini. Cette notion se rapproche ainsi de celle de proximité et envisage un rapprochement entre acteurs qui peut se présenter sous plusieurs formes. Les différentes proximités retenues comme grille d'analyse dans le cadre de cette étude sont la proximité géographique et les différentes formes de proximités organisées : proximité matérielle (partage de patrimoine, statut social, etc.), cognitive (normes, valeurs, intentions, etc.), relationnelle (réseau de relation) et de média (dispositifs d'échange). Interdépendantes les unes des autres, il convient d'étudier les moyens mobilisables en termes de réseaux de collaboration (relations et médias) pour redévelopper la filière bois wallonne en valorisant d'avantage les ressources locales (matérielles et cognitives) partagées au sein d'un même espace géographique.

Matériel et méthode

La zone d'étude considérée est la Wallonie, au sein de laquelle la superficie totale de la forêt est en augmentation constante depuis plus d'un siècle. Certaines nuances sont cependant à apporter en fonction du type d'essence considéré. Avec 134,5 % de taux de prélèvement

moyen, les résineux sont exploités plus rapidement que leurs stocks ne se reconstituent. A l'inverse les feuillus sont actuellement capitalisés puisque leur taux de prélèvement n'est actuellement que de 68%.

Malgré une ressource relativement abondante, la situation économique n'est pas stable pour le secteur et provoque quelques difficultés, particulièrement pour les scieurs : variabilité des prix, concurrence internationale, quantité de ressource disponible fluctuante, etc. Le cas des résineux dont la rectitude et les caractéristiques physiques permettent une exploitation et une transformation plus automatisée diffère fortement de celui des feuillus, caractérisé par un tissu d'entreprises plus petites et exploitant des volumes moindres avec des process souvent moins « modernes ». Malgré les variations annuelles, certaines tendances souvent négatives sont observées sur l'ensemble des dernières années. Par ailleurs, 2018 semble montrer des signes de reprises pour la majorité des essences exploitée (en termes de prix de vente), les chiffres se rapprochant de ceux avant la crise économique de 2008. Si la situation semble délicate pour les entreprises en amont de la filière (principalement scierie et première transformation), il semble exister des débouchés prometteurs. Ceci est notamment le cas du secteur de la construction bois puisque la demande en logement, le taux de construction bois (neuves et rénovations) et le nombre de maisons en bois construites en Wallonie sont en augmentation.

Avec pour objectif la mise en place d'une logique circuit court au sein du secteur (construction) bois, une enquête a été menée afin de mettre en évidence les opportunités et les freins en lien avec chacun des cinq types de proximité considérés. Pour ce faire, deux documents ont été rédigés : un guide d'entretien utilisé lors de seize entrevues auprès de responsables d'entreprises et un formulaire d'enquête complété par vingt-six professionnels de la filière. La volonté étant de développer une approche empruntée aux sciences sociales et aux sciences économiques, les entretiens qui ont été menés étaient de type semi-directifs compréhensifs. Cette appellation fait référence au caractère relativement libre des discussion et à l'implication de l'enquêteur dans l'échange, ce qui a permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées par le secteur, les craintes et les freins à son bon développement. Dans une démarche qualitative et exploratoire, la décision a été prise de réaliser un échantillon de volontaires parmi une sous-population constituée d'entreprises identifiées a priori comme portant un intérêt pour la mise en place de collaborations au sein du secteur ou pour la valorisation des ressources locales en bois. Non représentatives de l'ensemble de la filière bois wallonne, la pertinence de ce choix tient du fait des expertises capitalisées et reconnues de ces entreprises en lien avec la problématique de recherche.

Résultats et discussions

Proximité géographique

En l'état des choses, la filière bois est peu concurrentielle et certaines entreprises sont en difficulté. Une des principales causes de non compétitivité étant le coût élevé de la main d'œuvre en Belgique, il conviendrait de pouvoir se démarquer sur d'autres aspects. Dans cette optique, deux voies complémentaires se présentent : optimaliser les process de manière à limiter les coûts, et encourager l'innovation afin de trouver de nouveaux marchés disponibles. Dans les deux cas, les efforts à produire sont important et souvent difficiles à mettre en œuvre par une entreprise seule. La mise en place de réseaux de collaboration, pour la recherche et développement par exemple, est alors une piste à explorer. Dans ce cadre, malgré les moyens de communication modernes existants à l'heure actuelle (internet, TIC), la réussite de tels projets tient notamment de la capacité des partenaires à se rencontrer autour d'une table pour partager leurs envies, leurs idées et ainsi initier des projets, ou encore pour désamorcer les conflits qui pourraient émerger.

Pourtant, en Wallonie, les entreprises sont souvent éparpillées sur l'ensemble du territoire, parfois imbriquées dans le tissus rural (scieries), parfois situées près des axes de communication (transformation, grandes entreprises de construction, vendeurs de matériaux de construction) ou encore à proximité des centres urbains (architectes et petites entreprises de construction). Une réflexion pourrait donc être menée sur la mise en place de pôles industriels afin de rendre la logistique plus efficiente et de mettre en place des projets d'économie circulaire.

Proximités matérielles et cognitives

Des différences significatives en termes de valeurs (Fig. 1), traditions familiales, statuts sociaux, diplômes, etc. ont été mis en évidence entre les différents corps de métier de la filière bois. Toutefois, les différentes sphères de représentation qui peuvent en découler ne semblent pas empêcher les acteurs de travailler sur des projets communs. Si tous n'ont pas les mêmes raisons, tous ont le même objectif de valoriser le matériau bois. Il n'existe cependant pas de consensus sur le besoin de valoriser les bois locaux, surtout du côté des grossistes en bois. On assiste toutefois à une évolution de la demande, et certains de ces grossistes ou entrepreneurs commencent à la prendre en compte en proposant des alternatives, aux bois tropicaux notamment.

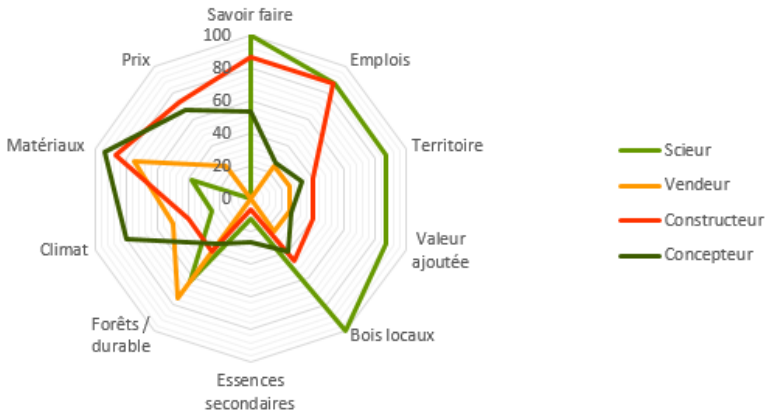


Fig. 1. Importances relatives de dix grandes valeurs justifiant la pratique productive des entreprises sondées

Sur la notion d'engagement, on constate deux types de profils plus complémentaires qu'antagonistes. Les uns étant tournés vers le maintien d'un savoir-faire existant, ils apportent une forme de stabilité à la filière qui pourra compter sur leur expertise et leur pratique de longue date du travail du bois. A l'inverse, les profils plus innovateurs sont généralement des personnes qui, bien qu'elles aient des compétences diverses et nombreuses (créativité, management, gestion de projet, process industriel, développement produit, …) sont parfois novices dans le secteur du bois. Ayant plus l'intention de mener à bien des collaborations, l'énergie et la volonté de rassembler des partenaires de ces personnes pourrait profiter à l'ensemble de la filière dès lors que l'ensemble de acteurs accepteraient de se mettre autour de la table pour partager leurs compétences et expertises respectives.

Proximités relationnelle et de média

Les proximités relationnelles et de média ont apporté un éclairage quant à l'existence actuelle de nombreuses collaborations (cent douze cas regroupés en quinze types ont été répertoriés au sein des quarante-deux entreprises que compte l'échantillon) parmi un important réseau de connaissances (la filière bois), mais celles-ci ne sont pas structurantes et ne sont souvent que ponctuelles. Il existe par ailleurs des réseau et médias d'ordre privé (fédérations, …) mais

ceux-ci ne parviennent pas à s'ouvrir aux autres secteurs afin de créer un réel pilotage de l'ensemble de la filière forêt-bois-construction. Il existe également des réseaux initiés par les pouvoirs publics mais au sein desquels les projets ne finissent pas toujours par aboutir, même s'il y a des exemples qui ont très bien fonctionné. Faire interagir un grand nombre d'acteurs est effectivement un projet délicat en plusieurs points :

- Il est d'autant plus difficile de faire émerger une intentionnalité commune que le caractère multi-sectoriel est grand ;
- Il existe un risque lié à une mauvaise taille des réseaux : trop peu de membre et les possibilités de renforcements mutuels sont faibles, trop de membre et il y a un risque d'inertie et de perte de confiance et de (re)connaissance.

Pour toutes ces raisons, on comprend la difficulté que représente la tâche de mobiliser l'ensemble des acteurs de la filière bois. Néanmoins une structure dans laquelle pourraient collaborer architectes, entrepreneurs et l'amont de la filière bois est nécessaire si l'on veut parvenir à développer davantage l'utilisation des bois produits localement dans la construction. Le cluster Eco-Construction veut répondre à ce besoin, mais peu d'entreprises de transformation du bois y sont représentées et l'implication des membres y est relativement faible, plusieurs entreprises rencontrées ayant expliqué s'y être inscrit plus pour avoir une vitrine supplémentaire que pour y participer réellement. Néanmoins quelques projets d'innovations ont abouti sur des résultats probants, surtout au niveau de sous-groupes (les « clubs ») rassemblant un nombre d'acteurs plus petits et dès lors plus engagés.

Conclusion et perspectives

La Wallonie est finalement perçue comme une entité territoriale dont la représentation est forte et à l'échelle de laquelle il est pertinent de développer une campagne de communication sur la valorisation des ressources locales. En effet, la demande croissante en produits durables et locaux, notamment en bois pour le secteur de la construction, fournit un cadre propice au redéveloppement de la filière bois.

Pourtant la filière ne semble pas profiter de cette conjoncture intéressante pour valoriser ses ressources. Ainsi, l'échelle du territoire wallon semble parfois trop grande lorsqu'il s'agit de mettre en place des collaborations entre les entreprises. Si la création de partenariats publics/privés sont à encourager (clusters et pôles de compétitivité), il convient de créer des sous-groupes afin de mettre en place des projets de petites et moyennes envergures regroupant des partenaires locaux. Alors que les différentes fédérations sont souvent cloisonnées, il est également important de permettre aux différents corps de métier de se coordonner en encourageant le développement de réseaux et de médias transversaux.

Principalement exploratoire, cette étude a finalement permis de mettre en évidence des faiblesses organisationnelles et de préciser où elles se situaient. Néanmoins, si elle peut fournir des pistes de réflexion intéressante, elle ne prétend pas fournir un modèle permettant d'établir quelles formes de collaboration seraient plus judicieuses. Faire ces propositions nécessiterait la réalisation d'un audit patrimonial pour lequel une plus grande diversité d'acteurs devrait être rencontrée (acteurs institutionnels, consommateurs, etc.).

Poster A16

Etude de l'effet d'un traitement thermique modéré sur l'hygroscopicité du bois par relaxométrie RMN du proton

ROSTOM Leila [1], CARE Sabine [1], COURTIER-MURIAS Denis [1], RODTS Stéphane [1]

[1] Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France
leila.rostom@enpc.fr

Mots clefs : Chêne ; Déformations hydriques ; RMN ; Traitement thermique modéré ; Sorption, Vieillissement physique.

Contexte et objectifs

Le bois, en tant que matériau de construction, est un matériau pertinent tant pour les bâtiments neufs que pour la rénovation d'anciennes bâtisses. Le patrimoine bâti montre que le bois permet de concevoir des monuments sains et durables. Pour toutefois estimer les durées de vie ou proposer des méthodes d'entretien ou de rénovation, il est nécessaire de poursuivre les efforts de recherche pour comprendre les mécanismes du vieillissement physique du bois et leurs effets sur ses propriétés hygro-mécaniques à l'échelle de ses constituants. Des études ont montré une diminution de la matière cellulosique dans le vieux bois par rapport au bois neuf, ainsi qu'une diminution de la teneur en lignine (Kránitz *et al.* 2016). De même, les vieillissements naturel ou artificiel induits par des traitements thermiques du bois entraînent une diminution de la teneur en humidité à l'équilibre et une meilleure stabilité dimensionnelle du bois en raison de la diminution des sites d'adsorption dans les chaînes polymériques des parois cellulaires (Murata *et al.* 2013). Par ailleurs de nombreuses études ont été menées pour développer des procédés industriels de chauffage permettant d'utiliser des bois de construction de faible durabilité en les rendant plus résistants aux attaques de champignons et améliorant ainsi leur résistance à la dégradation. Ceux-ci varient en termes de température (généralement à haute température entre 160°C et 280°C), de durée et de vecteur (gaz, vapeur d'eau, huile…) (Esteves et Pereira 2008). Plus la température de traitement est élevée (et plus la durée du traitement est longue), plus la stabilité dimensionnelle du bois est grande (Inari *et al*. 2009; Endo *et al*. 2016). Cependant, l'intensité de ces traitements affaiblit considérablement les propriétés mécaniques des bois tels que la résistance à la flexion et à la compression, la rigidité et la résistance au cisaillement (Candelier *et al.* 2016). Les traitements thermiques à plus basse température pourraient être une alternative pour améliorer la résistance à la dégradation biologique sans affaiblir les propriétés mécaniques du bois. Ils pourraient également permettre de simuler le vieillissement naturel étant donné que le bois ancien est censé être plus « stable » que le bois neuf.

Le but de cette étude est d'évaluer la relation entre la perte d'eau et le comportement hygroscopique de la structure de la paroi cellulaire avant et après un traitement thermique modéré. Par conséquent, la relaxométrie par résonance magnétique nucléaire du proton (^{1}H RMN) est utilisée pour détecter l'eau liée dans les parois cellulaires du bois. Cette méthode gagne en popularité dans le domaine de la recherche car elle est non invasive, non destructive et permet d'étudier le même matériau soumis à différentes sollicitations. Ici, nous étudions l'état de l'eau adsorbée sur les parois cellulaires du bois grâce à la relaxométrie RMN ^{1}H à faible champ (LF). Cette technique a montré une bonne précision en termes d'identification et de quantification de l'eau dans les parois et les lumens des cellules du bois (Araujo *et al.* 1994). Des études récentes (Bonnet *et al*. 2017) utilisant des spectres de corrélation T_1-T_2

bidimensionnels (2D) ont montré la présence de deux composants de l'eau liée (B et C sur la Fig. 1) dans la plage hygroscopique. Cette technique permet donc de corréler les changements observés dans la teneur en eau (pour chaque type d'eau liée individuellement) avec les changements physiques et chimiques qui ont lieu. Un objectif parallèle de cette étude est de comparer ces changements entre des échantillons de bois de feuillus historique et moderne.

Matériel et méthodes

Les expériences ont été effectuées sur des bois de feuillus, un chêne moderne et un chêne historique. La densité des échantillons est de 640 kg/m^3 pour le chêne moderne et de 480 kg/m^3 pour le chêne historique. De petits échantillons de bois de 1 cm^3 ont été préparés à l'aide d'une scie à ruban. Ils étaient tous exempts de défauts visibles et soumis à un cycle commun d'adsorption-désorption. Toutes les expériences ont été réalisées sur un cycle d'adsorption (à partir de 2% d'humidité relative (HR)) afin d'éviter l'influence de l'hystérésis dans les phénomènes observés.

Les traitements thermiques ont été effectués dans un four à une température de 120°C pendant 24 heures. Avant le traitement thermique, les échantillons ont été conditionnés à une humidité relative de 65%, 20°C et analysés par RMN 2D ^{1}H. Après le traitement thermique, les échantillons ont été à nouveau conditionnés à 65% HR, 20°C avant la seconde analyse RMN. Trois échantillons ont été pris en compte pour chaque cas afin de tenir compte de la variabilité du bois et de tester la reproductibilité et la répétabilité de la méthode utilisée.

Les déformations hydriques sont aussi déterminées à l'aide d'un comparateur et sont mises en relation avec la teneur en eau du bois avant et après le traitement thermique. Les résultats obtenus ne sont pas présentés dans cet article.

Premiers résultats et discussion

Les spectres de corrélation T_1-T_2 montrent le signal des atomes d'hydrogène détectés avant et après traitement thermique sous forme de pics (Fig. 1). Les temps de relaxation T_1 et T_2 permettent de caractériser ces pics en donnant une indication sur l'environnement local des protons détectés. Le pic désigné par la lettre D correspond aux atomes d'hydrogène des molécules du bois. En effet, le court temps de relaxation T_2 et le long T_1 donnent un ratio T_1/T_2 élevé, ce qui indique une faible mobilité des atomes et est la signature de molécules relativement rigides (Bonnet *et al.* 2017). Les pics B et C présentent un rapport T_1/T_2 inférieur à celui du pic D, révélant une plus grande mobilité de ces atomes d'hydrogène. Ainsi, ils sont attribués à l'eau liée dans les polymères de la paroi cellulaire. De plus, le temps de relaxation T_1 pour le pic B est différent de celui du pic C, ce qui montre que l'eau liée est située dans deux régions spécifiques des parois cellulaires. Le pic B présente un rapport T_1/ T_2 plus élevé que le pic C, ce qui indique un mouvement moléculaire plus restreint et suggère des interactions plus fortes avec les molécules de bois. A l'inverse donc, le pic C indique une interaction moins forte de l'eau liée avec les molécules du bois. Dans Bonnet *et al.* (2017), les deux composantes de l'eau liée ont été attribuées, pour le pin Douglas, comme suit: l'eau fortement liée (eau B) peut être située dans les macrofibrilles (matrice cellulose-glucomannane) et l'eau faiblement liée (eau C) dans la matrice lignine-xylane. Cette hypothèse ne peut cependant pas être utilisée pour interpréter nos résultats car le pourcentage et la composition des hémicelluloses diffèrent entre les bois de feuillus et de résineux. Les feuillus contiennent principalement du glucuronoxylane et une faible quantité de glucomannane. De plus, les unités xylanes sont fortement acétylées par rapport aux résineux, ce qui pourrait entraîner une cinétique de dégradation thermique plus importante (Chaouch *et al.* 2010). Les spectres de corrélation T_1-T_2 révèlent une diminution du rapport T_1/T_2 après un

traitement thermique, ce qui signifie que les atomes d'hydrogène sont un peu plus confinés et plus fortement liés aux polymères. Le phénomène qui sous-tend cette observation n'est pas encore compris et des mesures supplémentaires pourraient aider à l'expliquer.

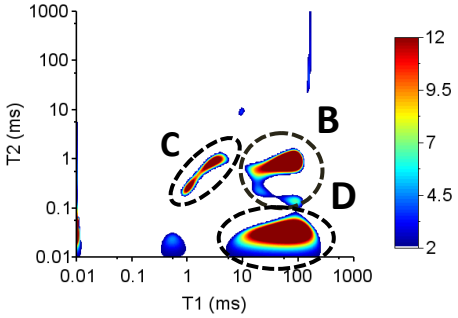


Fig. 1 : Exemple de spectre de corrélation T_1-T_2 (cas du bois de chêne moderne avant le traitement thermique)

La teneur en humidité a été calculée en convertissant les aires des pics B et C en quantité d'eau liée en utilisant une courbe de calibration et est définie comme le rapport entre la masse d'eau liée et la masse de bois sec (déterminée à 2% HR). Les résultats indiqués dans le Tab. 1 montrent une nette réduction de la teneur en humidité totale après traitement thermique et reconditionnement à 65% HR, accompagnée d'une perte de masse pour les deux chênes. Cette diminution de la teneur en eau est en accord avec la diminution des déformations entre 2% HR et 65% HR. De plus, les résultats présentés dans le Tab. 1 montrent un pourcentage plus élevé de perte d'eau dans le compartiment d'eau B que dans le compartiment d'eau C pour les deux matériaux. La raison de cette perte sélective d'adsorption d'eau n'est pas encore connue. Comme le suggère l'interprétation des spectres de corrélation T_1-T_2 (Bonnet *et al*. 2017), cette perte sélective d'eau pourrait être due à des modifications intervenant préférentiellement dans les macrofibrilles et à une perte de sites d'adsorption. Cependant, selon Kollmann et Fengel (1965) dans Esteves et Pereira (2008), la dégradation du bois ne commence qu'à 130-150°C pour le chêne. Ainsi, en chauffant à 120°C, il ne devrait y avoir aucune dégradation des polymères. Une autre hypothèse pourrait être que l'accessibilité des polymères du compartiment B est restreinte en raison d'autres changements dans la paroi cellulaire, tels que des modifications structurelles dues à la dégradation des extractibles durant le traitement thermique ou à une réorganisation des polymères. Afin de mieux répondre à ces hypothèses, la RMN du carbone (RMN ^{13}C) pourrait être utile pour déterminer plus spécifiquement les modifications induites par le traitement thermique.

Tab. 1 : Teneur totale en humidité (B + C), teneur en eau B et eau C avant et après traitement thermique à 120°C pendant 24 heures pour des échantillons conditionnés à 65% HR.

Echantillon		B+C (%)	B (%)	C (%)
Bois moderne	Avant traitement	11.9	9.2	2.7
	Après traitement	10.4	7.9	2.5
Bois historique	Avant traitement	11.3	7.7	3.6
	Après traitement	10.1	6.8	3.3

Conclusion et perspectives

Cette étude montre le potentiel des spectres de corrélation 2D en RMN ^{1}H pour étudier l'influence d'un traitement thermique sur le bois et pour suivre les évolutions des deux types d'eau adsorbées dans les parois cellulaires du bois. Un traitement thermique a été effectué sur des échantillons de chêne moderne et historique à 120°C pendant 24 heures. Les résultats

montrent une diminution de la teneur en humidité après le traitement thermique et plus précisément une perte plus importante d'eau dans le compartiment B. Les polymères associés à ce compartiment pourraient ne pas avoir subi de modifications chimiques en raison de la basse température de chauffage et les extractibles présents dans le bois pourraient être à l'origine des modifications structurelles intervenues. Ainsi, nous émettons l'hypothèse que l'accessibilité des polymères du compartiment B est restreinte en raison d'autres modifications structurelles dans la paroi cellulaire. Ces observations doivent être complétées par des mesures RMN du ^{13}C Infrarouge afin de préciser les changements survenus dans les polymères du bois. Enfin, des tests de ré-humidifications à hautes HR doivent être menés pour déterminer si le traitement thermique est réversible.

Remerciements

Nous remercions l'I-Site Future (Champs-sur-Marne, France) pour son soutien financier et l'Atelier Perrault (Nantes, France) pour nous avoir fourni le bois historique.

Références

Araujo, C.D., Avramidis, S., MacKay, A.L. (1994). Behaviour of solid wood and bound water as a function of moisture content: a proton magnetic resonance study. Holzforschung 48:69-74.

Bonnet, M., Courtier-Murias, D., Faure, P., Rodts, S., & Care, S. (2017). NMR determination of sorption isotherms in earlywood and latewood of Douglas fir. Identification of bound water components related to their local environment. Holzforschung, 71(6), 481-490.

Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrissans, A., Dumarcay, S., Gerardin, P., & Petrissans, M. (2016). Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. Annals of Forest Science, 73(3), 571-583.

Chaouch, M., Pétrissans, M., Pétrissans, A., & Gérardin, P. (2010). Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. Polymer Degradation and Stability, 95(12), 2255-2259.

Endo, K., Obataya, E., Zeniya, N., & Matsuo, M. (2016). Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood. Wood science and technology, 50(6), 1161-1179.

Esteves, B., & Pereira, H. (2008). Wood modification by heat treatment: A review. BioResources, 4(1), 370-404.

Inari, G. N., Pétrissans, M., Pétrissans, A., & Gérardin, P. (2009). Elemental composition of wood as a potential marker to evaluate heat treatment intensity. Polymer Degradation and Stability, 94(3), 365-368.

Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., & Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood: a literature review. Wood science and technology, 50(1), 7-22.

Murata, K., Watanabe, Y., & Nakano, T. (2013). Effect of thermal treatment on fracture properties and adsorption properties of spruce wood. Materials, 6(9), 4186-4197.

Poster A17

Mechanisms of liquid transport in softwood inferred from Magnetic Resonance Imaging

NGUYEN Dang Mao[1], CARE Sabine[1], COURTIER-MURIAS Denis[1], COUSSOT Philippe[1]

Laboratoire NAVIER, CNRS, IFSTTAR, ENPC, Champs sur Marne, France
sabine.care@ifsttar.fr

Keywords: Douglas-fir; Imbibition; MRI; Oil; Softwood; Sorption; Water.

Context, Objectives

Water in wood material plays a major role with regard to its mechanical or physical properties in various situations, in particular in outdoor applications, leading to a possible deterioration in the performance of the wood elements (eg. structural integrity, thermal insulation). Therefore, it is crucial to understand the water uptake and release as well how the water transports in the wood material to extend the lifetime of the timber buildings. The mechanisms of liquid transport are related to the hierarchical and multi-scale structure of wood and to the presence of free and bound water. Despite numerous studies, the water migration process in wood material is not well understood.

For this study, softwood materials used in construction are subjected to imbibition tests. Through an original approach coupling quantitative information obtained from mass and deformation measurements, Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) (Bonnet et al., 2017; Gezici-Koc et al., 2017; Van-Meel et al., 2011; Zhou et al., 2018), we are able to quantify bound and free water, which finally allows to better understand imbibition mechanisms. Additional experiments with oil (dodecane) allow to compare the characteristics of water imbibition with those of a liquid not hygroscopically adsorbed in wood.

Materials and methods

The materials are collected from Douglas-fir, either in the outer part of the trunk (sapwood) or the inner part (heartwood). All the samples are taken side by side in order to minimize the variability between them and are sawn along the anisotropic directions of wood. Each sample is initially stored at RH (relative humidity) of 53% at room temperature (20 °C).

Small samples of 1cm^3 are pre-conditioned at different humidity levels or are soaked into water or oil. The NMR relaxation technique is used to identify T_2 relaxation times of the different water states in wood (bound and free water) or of oil in wood.

Larger samples (10x4x2 cm^3) are prepared for imbibition tests. Four out of six faces are sealed with a liquid impermeable coating along the vertical sides parallel to the imbibition direction in order to avoid edge effects. The bottom open surface of the sample is placed in contact with water or oil, which can then progress along the longitudinal direction. MRI is used to determine water and oil distribution in wood. 2D pictures and 1D distribution profiles of liquid content are obtained by MRI. According to the distribution of the T_2 relaxation times, only free water is detected in our MRI tests, but the two types of free water could be distinguished that can be considered as corresponding to water in earlywood or in latewood. Besides, the content of bound water may be inferred from measurements of the (macroscopic) deformation field during the same tests. The validity of this approach is confirmed by mass

measurements, which appear to be consistent with that expected from the sum of free and bound water types.

Results and discussion

Water imbibition

In any case (sapwood or heartwood) the water uptake is not uniform in the transverse section due to the heterogeneity of the wood structure and the differences between earlywood and latewood whose alternation is at the basis of wood structure. Moreover, one observes a higher water transport rate in sapwood than in heartwood (see Fig.1). This may be explained by the fact that heartwood is commonly considered as the dead part while sapwood is the living, growing part which stores and transfers water and minerals inside trees. Furthermore, sapwood has lower fraction of closed valves (pits aspiration) compared to heartwood, resulting in a lower resistance for water flow (Sedighi-Gilani et al., 2012; Sedighi-Gilani et al., 2014).

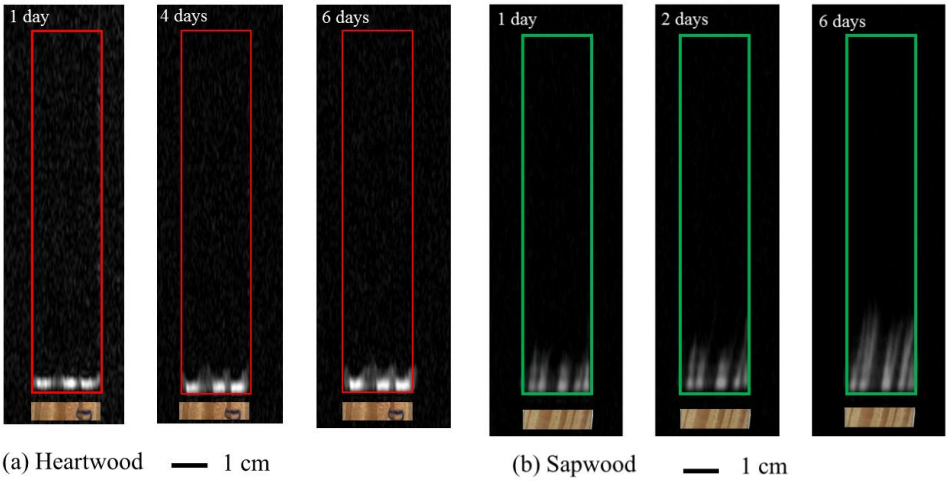


Fig. 1: 2D MRI images of the water penetration of Douglas fir in the radial plane: (a) heartwood and (b) sapwood at different times.

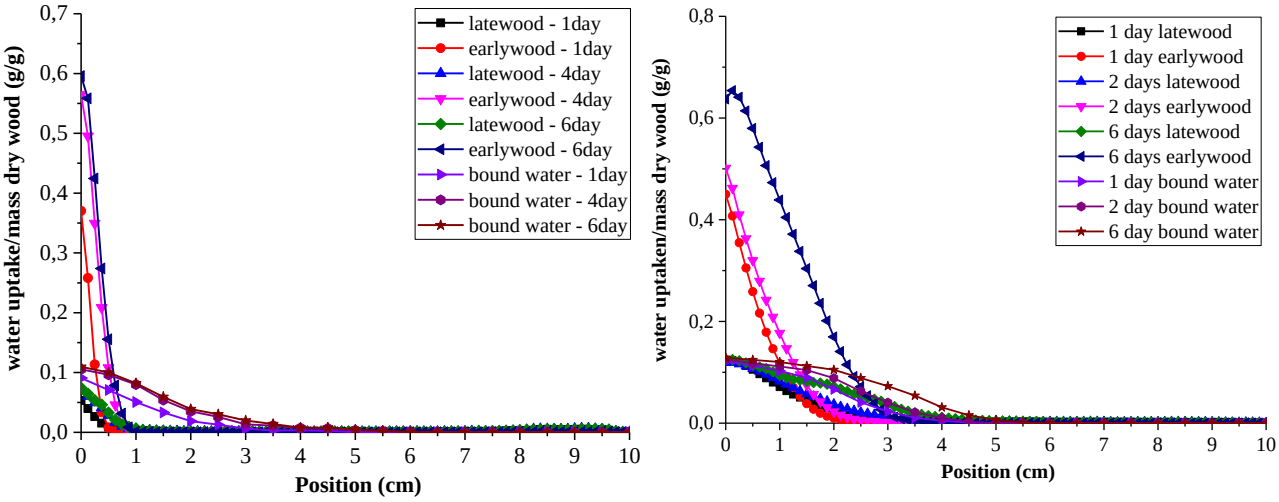


Fig. 2: Water distribution profiles in Douglas-fir, along the longitudinal direction, during imbibition tests, bound water (filled symbols) and free water (cross symbols) for heartwood (a) after: 1 day (black), 4 days (red) and 6 days (blue); and for sapwood (b) after: 1 day (black), 2 days (red) and 6 days (blue).

Bound water clearly progresses more rapidly than free water in the sample during imbibition tests (see Fig.2). Such an effect was already observed in hardwood, where it was shown that wetting is damped by the liquid sorption in cell walls, so that free water dynamics is governed by the bound water advance (Zhou et al., 2018). However, here the situation may be somewhat different since it may be observed that in sapwood free water advances much faster than in heartwood. This is consistent with the fact that in heartwood more valves are closed, so that free water cannot progress beyond a first set of open tracheids, except by first being adsorbed as bound water.

Dodecane imbibition

Fig. 3 shows the distribution of the dodecane oil inside the heartwood and sapwood samples from 2D MRI images in a radial plane. It can be observed that, with heartwood, the oil seems to preferentially penetrate in latewood along sample vertical axis (see Fig. 3a). In sapwood, dodecane can penetrate in both earlywood and latewood (see Fig. 3b). The difference in the mechanisms and rate of oil transport in the two types of wood is likely due to the fact that, in heartwood, all bordered pits in earlywood are closed due to the elasticity of their membrane (Sperry and Tyree, 1990).

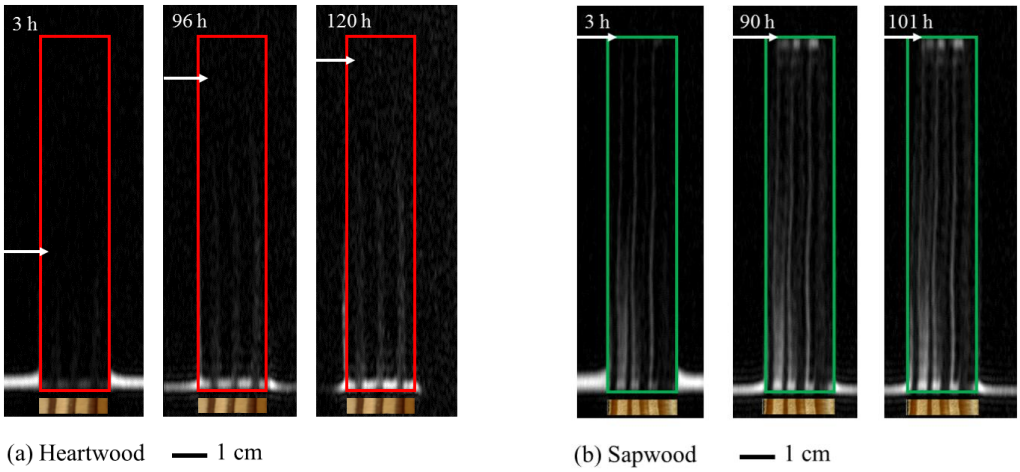


Fig.3: 2D MRI images of dodecane distribution in the radial plane of heartwood (a) and sapwood (b) at different times.

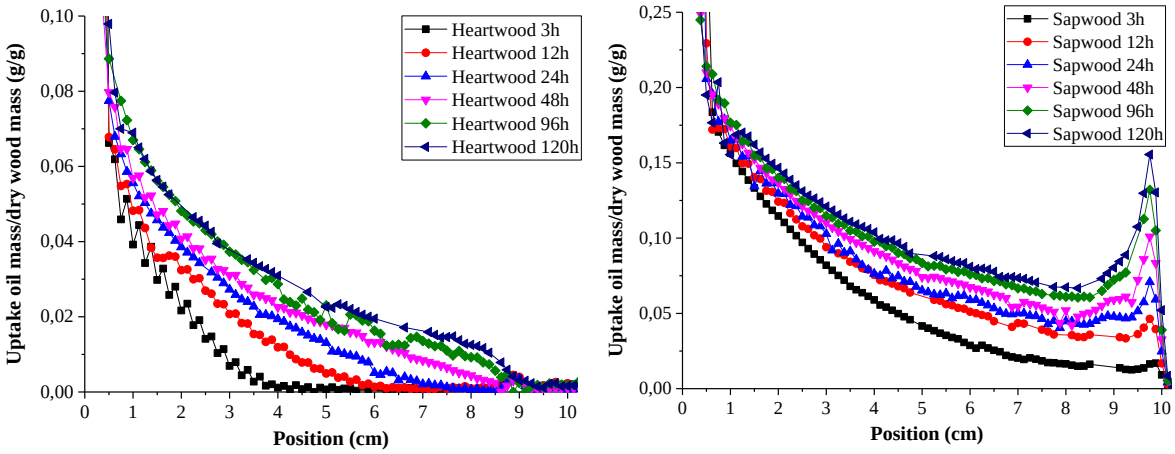


Fig. 4: Profiles of dodecane oil, along the longitudinal direction, at different times from MRI measurements: (a) heartwood and (b) sapwood

The 1D profiles showing the penetration of the dodecane into heartwood and sapwood as a function of time are plotted in Fig. 4. Dodecane progresses along the sample vertical axis with time. Furthermore, dodecane penetrates more rapidly into sapwood than into heartwood and spreads along the top of the sample. Dodecane content is higher into sapwood in coherence with its location into earlywood and latewood.

Conclusion

Our data reveal interesting features concerning the process of water and dodecane imbibition in softwood. It appears to be complex as the liquid transport is influenced both by the complex geometric structure of the wood, with open or closed paths, and by the interaction between bound water adsorption and wetting. Moreover, dodecane penetrates more rapidly than water within the wood due to the interplay of bound water with cell walls. Indeed, the free water progression is governed by the end of the region saturated with bound water.

Acknowledgements

This work has benefited from a French government grant managed by ANR within the frame of the national program Investments for the Future ANR-11-LABX-022-01 (Labex MMCD, http://mmcd.univ-paris-est.fr/).

References

Bonnet M., Courtier-Murias D., Faure P., Rodts S., Care S. (2017) NMR determination of sorption isotherms in earlywood and latewood of Douglas fir. Identification of bound water components related to their local environment. Holzforschung, 71, 481–490.

Gezici-Koc O., Erich S.J.F., Huinink H.P., Ven L.G.J., Adan O.C.G. (2017) Bound and free water distribution in wood during water uptake and drying as measured by 1D magnetic resonance imaging. Cellulose, 24, 535–553.

Sedighi-Gilani M., Griffa M., Mannes D., Lehmann E., Carmeliet J., Derome D. (2012) Visualization and quantification of liquid water transport in softwood by means of neutron radiography. International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 6211–6221.

Sedighi-Gilani M., Vontobel P., Lehmann E., Carmeliet J., Derome D. (2014) Liquid uptake in Scots pine sapwood and hardwood visualized and quantified by neutron radiography. Materials and Structures, 47, 1083–1096.

Sperry J.S., Tyree M.T. (1990) Water stress-induced xylem embolism in three species of conifers. Plant, Cell & Environment, 13, 427-436.

Van-Meel P.A., Erich S.J.F., Huinink H.P., Kopinga K., Jong J.D., Adan O.C.G. (2011) Moisture transport in coated wood. Progress in Organic Coatings, 72, 686– 694.

Zhou M., Caré S., Courtier-Murias D., Faure P., Rodts S., Coussot P. (2018) Magnetic resonance imaging evidences of the impact of water sorption on hardwood capillary imbibition dynamics. Wood Science and Technology, 52, 929–955.

Poster A18

Etude du comportement des biocides lors de vieillissements de bois traités en classe d'emploi 3 par des méthodes physico-chimiques d'analyse

Oussemah Ouali[1,2], Elisabeth Raphalen[1], Stéphane Legay[1], Hélène Budzinski[2], Karyn Le Ménach[2], Marie-Hélène Devier[2]

[1]Institut Technologique FCBA (Laboratoire de chimie-écotoxicologie)
[2]EPOC, Laboratoire de Physico- et Toxico-Chimie de l'environnement (UMR CNRS 5805), Université de Bordeaux
oussemah.ouali@fcba.fr

Mots clefs : Biocide ; Chimie ; Bois ; Menuiserie ; Chimie Analytique ; Environnemental ; Vieillissements

Contexte et Objectifs

Matériau naturel et renouvelable, le bois est une ressource essentielle pour une multitude d'industries. Selon l'essence de bois utilisée, le bois peut nécessiter un traitement chimique afin d'être protégé contre les risques de détérioration d'origine biologique (FCBA 2014). Le potentiel impact environnemental de certains biocides a fait l'objet de nombreuses études (Weis 1995, Marchal 1996, Stilwell 1997). Cela a entrainé la création de nombreuses réglementations, ayant pour conséquence l'interdiction ou la réglementation de ces substances. Les formulations actuelles de produit de préservation du bois, en accord avec la règlementation européenne (UE) n°528/2012, utilisent principalement des complexes de cuivre, de l'acide borique, des sels d'ammoniums quaternaires et des biocides organiques. Les bois de menuiseries extérieures sont exposés à une multitude de facteurs d'altérations (intempéries, rayons UV, variations de température, …) qui ont un impact direct sur l'évolution des concentrations en substances actives, et donc sur la durabilité conférée contre les attaques d'origine biologique (Fig. 1).

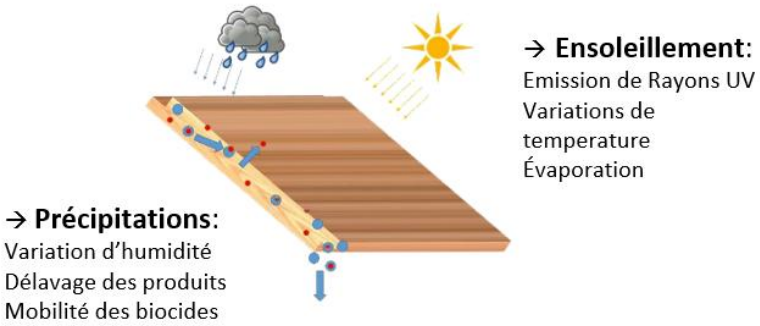


Fig. 1 : Les principaux facteurs de dégradation et leur impact sur le bois en œuvre (classe d'emploi 3)

Plusieurs paramètres jouent un rôle dans la fixation des biocides comme le type d'essence, les co-formulants utilisés ou encore l'application d'un revêtement. Les objectifs de cette thèse sont les suivants :

- Étudier les caractéristiques physico-chimiques des biocides (stabilité, transferts-transformations, propriétés insecticides et fongicides des sous-produits) au travers de

différents produits de traitement présents sur le marché français, en développant les méthodes analytiques adéquates (molécules mères et leurs produits de dégradation) ainsi que différents types d'expérimentations simplifiées en laboratoire (effets de la température, des UV, du rayonnement solaire, de l'eau, …).

- Appliquer ces outils bibliographiques et analytiques à des études de vieillissement (naturel NF EN 927-3 et accéléré NF EN 927-6) de bois traités en classe d'emploi 3, en faisant varier certains paramètres (facteurs de dégradation, produits de traitement, présence/absence de finition, …), afin d'appréhender les facteurs climatiques influençant la perte en biocides.

- Établir des modèles de mobilité des produits de traitement dans les bois et dans l'environnement grâce à des échantillonnages passifs, en s'intéressant à l'effet barrière de la finition, pour définir les paramètres favorables à une meilleure fixation des biocides dans les bois traités en œuvre.

- Etablir des modèles de prédiction de durée de vie, par l'estimation des teneurs en biocides dans le bois traité pour des menuiseries extérieures.

Développement de méthodes analytiques

La première étape porte actuellement sur l'étude physico-chimique des biocides couramment utilisés dans la protection du bois, dans différentes formulations présentes sur le marché français (Tab. 1). Une étape de développement & validation de méthodes analytiques est menée pour compléter les méthodes existantes sur les molécules mères ainsi que sur leurs principaux métabolites dans les bois avec pour matrice le Pin Sylvestre, essence couramment utilisée en menuiserie extérieure.

Tab. 1 : La liste des familles de biocides du traitement de bois étudiés

Famille de biocides	Nombre de biocides étudiés	Fonction
Pyréthrinoïdes de synthèse	2	Insecticides
Triazoles	2	Fongicides
Carbamate	1	Fongicide
Dérivé de morpholine	1	Fongicide
Ammoniums quaternaires	3	Tensioactifs, Fongicides, Insecticides
Acide inorganique	1	Fongicide, Insecticide

Les extractions de bois se font par extraction par solvant accélérée (ASE) et les développements analytiques par GC/MS/MS, GC/QTOF et LC-MS/MS à l'échelle majeure et de trace sur des bois non-traités dopés et des bois traités broyés.

Premiers travaux

Parallèlement à la clôture d'une étude d'essais d'efficacité sur des bois traités exposés 6mois en extérieur (classe d'emploi 3), des premiers travaux ont pu être réalisés sur des éprouvettes de Pin Sylvestre afin de s'intéresser à l'interface bois traité – finition. Les essais de vieillissement naturel seront ensuite lancés avec une collecte chronologique des bois et des eaux de lixiviation dans le cadre des essais terrains.

Références

FCBA (2014), « Durabilité biologique des menuiseries extérieures en bois », Guide de conception, CODIFAB.

NF EN 927-3 (2012) : Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour bois en extérieur - Partie 3 : essai de vieillissement naturel

NF EN 927-6 (2006) : Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour bois en extérieur - Partie 6 : vieillissement artificiel des revêtements pour bois par exposition à des lampes UV fluorescentes et à de l'eau

Marchal P. (1996), Étude des émissions de fongicides à partir de bois traites. Impact sur les compartiments aquatique et aérien, Thèse de Doctorat de l'université de Metz

Stilwell DE, Gorny KD (1997), Contamination of soil with copper, chromium, and arsenic under decks built from pressure treated wood. Bull Environ Contam Toxicol; 58:22-29.

Weis, J.S., Weis, P. (1995), Effects of chromated copper arsenate (CCA) pressure treated wood in the aquatic environment. Ambio 24, 269±274.

Poster A19

Développement d'une méthodologie expérimentale et numérique multi-échelles d'analyse de la propagation des feux de façade en bois.

SAUVAGERE Julien[1,2], ROGAUME Thomas[1], RICHARD Franck[1], GAILLARD Jean-Marie[2]

[1]INSTITUT Pprime (UPR 3346 CNRS) Université de Poitiers, ISAE-ENSMA
[2]FCBA Institut technologique, Allée de Boutaut, 33028 Bordeaux
julien.sauvagere@univ-poitiers.fr

Mots clefs : feu ; façade ; bois ; LEPIR2 ; modèles numériques ; simulations

Contexte et objectifs

S'appuyant sur le développement d'études d'ingénierie articulées autour de contraintes réglementaires et normatives en constante évolution, la sécurité incendie, de par la forte sinistralité et victimologie engendrées, est en constant renforcement afin d'améliorer les modèles de simulation numérique et de prendre des mesures de prévention et de protection pertinentes selon les recommandations du Ministère de l'intérieur, de l'outre-mer et des collectivités territoriales (2010). Au sein des bâtiments, cette sécurité est associée aux matériaux de construction mais aussi aux choix architecturaux réalisés. En parallèle, l'utilisation de matériaux « verts » dans la construction, dont le bois, est en plein essor ainsi que l'évolution de la réglementation nationale sur les feux de façades via les réglementations thermiques BBC, RT 2012 et RT 2020, rendant obligatoire en 2014 l'utilisation du test en vraie grandeur LEPIR2 prescrit par le Ministère de l'intérieur et ministère de l'équipement et du logement (1970).

Les études d'ingénierie de la sécurité incendie peuvent être réalisées d'un point expérimental, à différents niveaux d'échelle. Néanmoins, dans le cas particulier des façades, les essais en vraie grandeur LEPIR2 sont onéreux. L'utilisation de simulations numériques est alors indispensable à condition que les modèles utilisés soient pertinents et puissent décrire de tels scénarios, où les couplages entre les phénomènes en phase condensée et ceux en phase gazeuse sont très forts.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente thèse avec pour objectifs :

-de développer des modèles numériques de simulation fiables afin de décrire avec le plus de précision possible l'essai LEPIR2 pour les façades bois.

-de permettre l'optimisation des solutions constructives qui peuvent être mises en place afin d'améliorer la sécurité des installations (déflecteurs, parements par exemple).

Ce développement repose sur une compréhension et une description des phénomènes mis en jeu au cours de l'essai LEPIR2 et lors des configurations de feux de façades comme le montre la figure 1, notamment sur les aspects :

-écoulement et structure de la flamme depuis le bûcher initial de l'essai.

-décomposition thermique et inflammation du bois en bardage.

-de manière associée, propagation de la flamme le long de la paroi au cours de l'essai avec interaction entre le feu source de l'essai et la combustion du bardage.

-couplage des phénomènes en phases condensées et gazeuses.

Fig. 1 : Présentation des processus à simuler

Cela conduit au besoin de développer des modèles décrivant la pyrolyse, l'inflammation et l'interaction flamme-paroi pour améliorer les codes de calcul.

Matériel et méthode

Le développement de tels modèles repose sur une démarche expérimentale multi-échelle, utilisée par Marquis (2012), de l'échelle matière à l'échelle réelle, déjà utilisée au sein de l'équipe de recherche de l'Institut Pprime. Il s'agit alors, comme indiqué sur la figure 2, à échelle décroissante de déterminer les paramètres clés et les propriétés des matériaux, puis à échelle croissante, de rajouter de la complexité nécessaire à la validation du modèle.

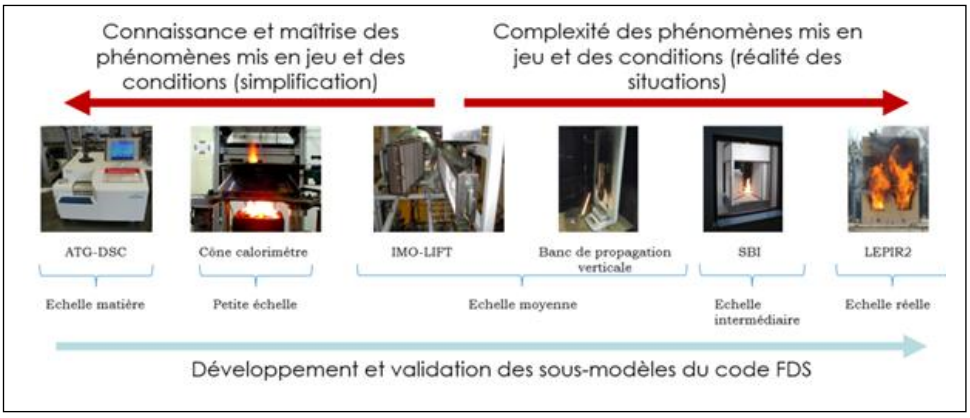


Fig. 2 : Méthodologie et validation des sous-modèles du code FDS

Dans le cadre de cette thèse, deux matériaux sont étudiés : un bois brut de type Douglas et un contreplaqué ignifugé.

Premiers résultats

Une première approche à l'échelle matière en ATG/DSC a permis de définir les mécanismes de décomposition thermique et les propriétés thermochimiques selon les modèles de Batiot (2014) (Cp, enthalpie de réaction…) des matériaux étudiés. Cette investigation a été complétée d'une simulation en 0 dimensions du processus à l'aide du code de calcul Fire Dynamics Simulator (2013) développé par le NIST.

L'étude expérimentale à petite échelle, en cône calorimètre selon la norme ISO (2002), a permis une validation numérique en 1 dimension des sous-modèles de décomposition thermique définis à l'échelle matière et une analyse de la pyrolyse et des modèles de combustion selon la méthode de Fateh (2011).

Conclusion et perspectives

Les premiers résultats aux petites échelles montrent un besoin de connaitre certains des paramètres définissant le matériau étudié afin de gagner en précision sur les simulations numériques.

Les phénomènes de propagation de flamme et des lois de paroi (aéraulique et dégagement gazeux) sont en cours d'étude sur les systèmes IMO-LIFT selon la norme ISO (2006), un banc de propagation vertical spécifiquement développé pour cette étude et en SBI selon la norme de l'AFNOR (2010) afin de compléter les sous-modèles du code FDS et permettre une validation de celui-ci à l'échelle réelle de l'essai LEPIR2.

Références

AFNOR (2010), Essais de réaction au feu des produits de construction – Produits de construction à l'exclusion des revêtements de sol exposés à une sollicitation thermique provoquée par un objet isolé en feu, EN 13823:2010+A1:2014, ISO 5660-1:2002, 104 p.

Batiot B. (2014) Etude expérimentale et numérique de la décomposition thermique du bois résineux. Thèse de doctorat en fluide, thermique et combustion. Poitiers : Ecole nationale supérieur de mécanique et d'aérotechnique, 186 p.

Fateh T., Rousseaux P., Rogaume T. (2011) Etude expérimentale et numérique de la cinétique de décomposition thermique de contreplaqué en bois. Thèse de doctorat en fluide, thermique et combustion. Poitiers : Ecole nationale supérieur de mécanique et d'aérotechnique, 188 p.

Fire Dynamics Simulator user's guide, 6th edition (2013) – Version 6.0.0, NIST

ISO (2006), Essais de réaction au feu – Propagation du feu – Partie 2 : propagation latérale sur les produits de bâtiment et de transport en position verticale, ISO 5658-2 : 2006, Résolution IMO A.653(16), ASTM E 1317, ASTM E 132, 35p.

ISO (2002)Essais de réaction au feu – Débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse – Partie 1 : Débit calorifique (méthode au calorimètre à cône) et taux de dégagement de fumée (mesurage dynamique), ISO 5660-1 : 2002, 59 p.

Marquis D., Pavageau M., Guillaume E. (2012) Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement au feu d'un composite pour son utilisation en construction navale. Thèse de doctorat en énergie, thermique et combustion. Nantes : Ecole des mines, 309 p.

Ministère de l'intérieur, de l'outre-mer et des collectivités territoriales (2010), IT 249 instruction technique relative aux façades - annexée à l'arrêté du 24 mai 2010, Journal Officiel n°0154 du 6 juillet 2010, p. 12248.

Ministère de l'intérieur et ministère de l'équipement et du logement (1970), Arrêté du 10 septembre 1970 Classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie, Journal Officiel du 29 septembre 1970, p. 9054

Poster A20

Caractérisation expérimentale et simulation stochastique du comportement des meubles à base de panneaux de particules

CHEN Zhou[1,2], PLED Florent[1], CHEVALIER Luc[1], LAUNAY Eric[2]

[1]Université Paris-Est, Laboratoire Modélisation et Simulation Multi Echelle, MSME UMR 8208 CNRS, Marne-la-Vallée, France
[2]Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, FCBA, Champs sur Marne, France
zhou.chen@univ-paris-est.fr

Mots clefs : Identification de propriétés élastiques ; Corrélation d'images numériques ; Méthode des éléments finis ; Panneau de particules isotrope transverse ; Simulation numérique stochastique ; Modélisation probabiliste

Contexte, objectifs et méthodologie

Dans le domaine de l'industrie mécanique, la simulation numérique est un outil puissant au service de la conception de produits et la réalisation d'essais virtuels sur des prototypes numériques permet de raccourcir la phase de mise au point et d'optimisation des produits. Le secteur de l'ameublement n'a pas intégré l'approche par simulation numérique aussi vite que des domaines tels que l'automobile, l'aéronautique ou le génie civil, et l'institut technologique FCBA souhaite donc mettre en place une stratégie de modélisation numérique d'essais réels au service des industriels du secteur (Makhlouf et al., 2016). De nombreux outils de calcul 3D permettent aujourd'hui de réaliser ces simulations numériques, mais le domaine de l'ameublement présente certaines spécificités liées aux matériaux utilisés et à la géométrie : d'une part, les matériaux à base de bois (ici, panneaux de particules) présentent beaucoup de dispersions dans leur comportement hétérogène et anisotrope (Wilczynski et Kociszewski, 2012) et d'autre part, les éléments de meuble sont généralement de géométrie simple assimilable à un assemblage de plaques et/ou de poutres. Néanmoins, les différentes liaisons entre éléments de meubles peuvent être complexes et induire des effets locaux qu'une modélisation cinématique simplifiée de type plaques et/ou poutres ne peut représenter (Chevalier et al., 2018). Le présent travail traite de ces particularités et présente la modélisation probabiliste et l'identification expérimentale des propriétés mécaniques de panneaux de particules et des liaisons entre plaques d'un bureau à partir de la corrélation d'images numériques (DIC pour ''Digital Image Correlation'') afin de réaliser des simulations stochastiques du comportement mécanique du meuble sous différents cas de charges statiques.

Tout d'abord, des essais de flexion sont effectués sur une vingtaine d'échantillons de meubles prélevés dans 5 bureaux identiques pour l'identification des propriétés mécaniques des meubles à l'aide de techniques d'imagerie DIC. Les paramètres matériaux incertains sont modélisés par des variables aléatoires suivant des lois de probabilité *a priori* inconnues (Guilleminot et Soize, 2013). Un modèle probabiliste des paramètres incertains est alors construit en utilisant le principe de maximum d'entropie (MaxEnt) combiné avec une méthode de Monte-Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) basée sur l'algorithme de Metropolis-Hastings pour la génération de réalisations des variables aléatoires. Enfin, des simulations numériques (essais virtuels) d'un bureau sous charge statique sont réalisées pour propager les incertitudes portant sur les propriétés matériaux à travers le modèle de plaques et évaluer l'impact de ces variabilités sur la réponse de la structure. Plusieurs essais réels ont été

précédemment effectués sur le bureau afin de valider l'approche numérique proposée. Un très bon accord est observé entre les résultats des calculs numériques et les mesures expérimentales.

Caractérisation expérimentale des meubles à base de panneaux de particules

On considère un modèle isotrope transverse (Torquato, 2002) pour modéliser le comportement élastique du matériau panneaux de particules représenté par une plaque sandwich à trois couches :

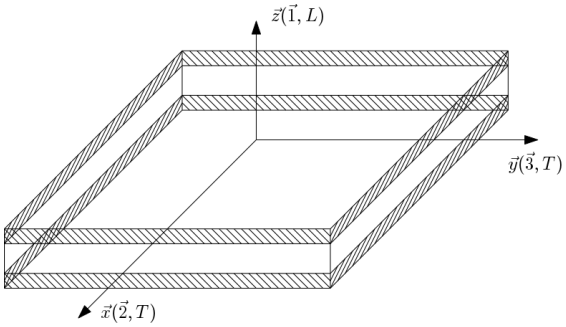


Fig. 1 : Modèles géométrique et matériaux

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E^L} & -\frac{\nu^L}{E^L} & -\frac{\nu^L}{E^L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu^L}{E^L} & \frac{1}{E^T} & -\frac{\nu^T}{E^T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu^L}{E^L} & -\frac{\nu^T}{E^T} & \frac{1}{E^T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G^T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G^L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G^L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Fig. 2 : Dispositif d'essai expérimental pour l'identification des rigidités des jonctions

Le tenseur d'élasticité représentant les propriétés du matériau dépend de 5 paramètres algébriquement indépendants à identifier : les modules d'Young longitudinal E^L et transverse E^T, les coefficients de Poisson longitudinal ν^L et transverse ν^T, et le module de cisaillement longitudinal G^L, conduisant au module de cisaillement transverse $G^T = E^T/(2(1+\nu^T))$. Pour réaliser cette identification, des essais de flexion 3 points sont effectués et suivis par corrélation d'images numériques. La solution analytique $\vec{u}_{\text{ana}}$ du modèle poutre en flexion simple étant connue [1], le champ de déplacement $\vec{u}_{\text{exp}}$ mesuré dans la région d'intérêt permet d'identifier les modules E^Tet G^L par la méthode des moindres carrés :

$$\min_{(E^T, G^L, u_0, v_0, \varphi_0)} \left\| \vec{u}_{\text{ana}}\left(E^T, G^L, u_0, v_0, \varphi_0\right) - \vec{u}_{\text{exp}} \right\|^2$$

où $\left(u_0, v_0, \varphi_0\right)$ représente les éventuels mouvements de corps rigides ou glissements de l'échantillon durant l'essai. Une méthode couplée à la simulation par éléments finis (FEMU pour ''Finite Element Model Updating'') est appliquée pour l'identification des modules E^L et ν^L en utilisant les valeurs précédemment identifiées des paramètres E^Tet G^L. On minimise alors l'écart entre le champ de déplacement $\vec{u}_{\text{exp}}$ mesuré expérimentalement et celui $\vec{u}_{\text{num}}(E^L, \nu^L)$ calculé par éléments finis :

$$\min_{(E^L, \nu^L)} \left\| \vec{u}_{\text{num}}(E^L, \nu^L) - \vec{u}_{\text{exp}} \right\|^2$$

La caractérisation directe des rigidités des liaisons entre plaques du bureau est délicate, en raison notamment des restrictions liées aux dimensions de la machine d'essai et du montage. Par conséquent, des éléments de jonctions sont découpés dans le meuble testé (ici, un bureau) et leur comportement sous charge statique est comparé à la solution analytique de deux plaques reliées par une jonction élastique modélisée par un ressort en flexion.

Simulation stochastique du comportement de meubles

Des modèles éléments finis de plaques minces (dites de Kirchhoff-Love) qui négligent l'influence du cisaillement et de plaques épaisses (dites de Reissner-Mindlin) qui prennent en compte le cisaillement (Dhatt et Batoz, 1990) ont été implémentés et validés sur des problèmes académiques. Le comportement mécanique du bureau est modélisé par un assemblage de plaques avec des liaisons élastiques représentées par des ressorts linéiques en flexion.

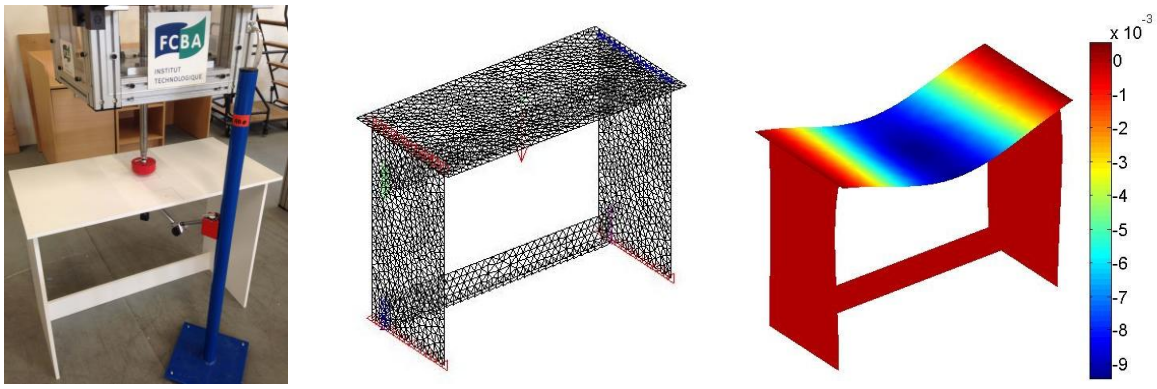


Fig. 3 : Essai réel, modélisation et simulation numérique d'un bureau sous charge verticale

Une modélisation probabiliste paramétrique des incertitudes sur le tenseur d'élasticité $\mathbb{C}$ et sur les rigidités K des liaisons est construite à partir du principe du MaxEnt qui utilise l'information disponible sur $\mathbb{C}$ et K pour déterminer les densités de probabilité $p_{\mathbb{C}}$ et p_K, et de la méthode du maximum de vraisemblance qui utilise les données expérimentales sur $\mathbb{C}$ et K pour estimer les paramètres inconnus des lois de probabilité $P_{\mathbb{C}}$ et P_K. Les rigditiés incertaines K sont supposées indépendantes et suivent des lois Gamma. La représentation matricielle $[\boldsymbol{C}]$ du tenseur aléatoire d'élasticité isotrope transverse $\mathbb{C}$ est décomposée sur la base des tenseurs de Walpole $\{[E^{(1)}], \dots, [E^{(6)}]\}$ et peut s'écrire sous la forme (Guilleminot et Soize, 2013)

$$[\boldsymbol{C}] = C_1[E^{(1)}] + C_2[E^{(2)}] + C_3([E^{(3)}]+[E^{(4)}])+ C_4[E^{(5)}]+C_5[E^{(6)}]$$

où $\{C_1, \dots, C_5\}$ est un ensemble de variables aléatoires réelles qui s'expriment en fonction des 5 paramètres matériaux $(E^T, G^L, E^L, \nu^L, \nu^T)$. La densité de probabilité $p_{\boldsymbol{C}}$ du vecteur aléatoire $\boldsymbol{C} = (C_1, \dots, C_5)$ peut alors se mettre sous la forme

$$p_{\boldsymbol{C}}(\boldsymbol{c}) = p_{(C_1,C_2,C_3)}(c_1, c_2, c_3) \times p_{C_4}(c_4) \times p_{C_5}(c_5)$$

Les composantes C_1, C_2 et C_3 sont des variables aléatoires statistiquement dépendantes dont la densité de probabilité a un support conique $S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}; xy - z^2 > 0\}$:

$$p_{(C_1,C_2,C_3)}(c_1, c_2, c_3) = \mathbb{I}_S(c_1, c_2, c_3)k(c_1c_2 - c_3^2)^{-\lambda}\exp\left(-\sum_{i=1}^{3}\lambda_i c_i\right)$$

où k est une constante de normalization. Des réalisations indépendantes du vecteur aléatoire (C_1, C_2, C_3) sont générées en utilisant une méthode MCMC basée sur l'algorithme de

Metropolis-Hastings. Les composantes C_4et C_5 sont des variables aléatoires statistiquement indépendantes de loi Gamma.

La résolution du problème stochastique est menée en utilisant la méthode de simulation numérique de Monte Carlo afin de réaliser des essais virtuels sur le bureau. Une série d'essais réels a été effectuée sur le bureau (ici, seul l'essai de charge verticale est illustré sur la Fig. 3). Le Tab. 1 regroupe et compare les résultats des calculs numériques avec les mesures expérimentales du champ de déplacement. L'impact de la dispersion observée sur les propriétés matériaux du meuble est évalué sur la réponse de la structure.

Tab. 1 : Comparaison des résultats entre calculs numériques et mesures expérimentales

Test	Charge (N)	Déplacement numérique (mm)	Déplacement expérimental (mm)	Erreur relative (%)
Vertical	300	8.56 (±0.366)	9.20 (±0.12)	6.86
	400	11.19 (±0.478)	12.85 (±0.12)	12.95
Horizontal	100	3.52 (±0.144)	3.78 (±0.14)	6.91
	200	7.19 (±0.294)	10.72 (±0.16)	32.9

Conclusions

Les propriétés mécaniques du matériau bois en panneau de particules (hétérogène et anisotrope) ainsi que les rigidités des jonctions ont été identifiées par des essais de flexion 3 points et de résistance de liaisons entre plaques. Des techniques de corrélation d'images ont été utilisées pour réaliser cette identification. Des modèles de plaques minces (de Kirchhoff-Love) et épaisses (de Reissner-Mindlin) ont été implémentés et utilisés pour simuler le comportement mécanique d'un bureau sous différents cas de charges statiques. Les dispersions des paramètres identifiés ont été prises en compte à travers la construction des densités de probabilité à partir des informations fournies par les mesures. La méthode Monte Carlo a été adoptée pour propager les incertitudes à travers les modèles de plaques et déterminer des quantités d'intérêt probabilistes.

Références

Chevalier L., Makhlouf H., Jacquet-Faucillon B., Launay E. (2018) Modeling the influence of connecting elements in wood products behavior: a numerical multi-scale approach. Mechanics & Industry, 19(3):301.

Makhlouf H., Chevalier L., Favier E., Launay E. (2016) A stochastic approach for the evaluation of the reliability of wood furniture in an industrial context: managing virtual standardization tests. Mechanics & Industry, 17(5):503.

Dhatt G., Batoz J-L. (1990) Modélisation des structures par éléments finis. Volume 2, Poutres et plaques, Paris Hermès.

Guilleminot J., Soize C. (2013) On the Statistical Dependence for the Components of

Random Elasticity Tensors Exhibiting Material Symmetry Properties. Journal of Elasticity, 111(2):109-130.

Wilczynski A., Kociszewski M. (2012) Elastic properties of the layers of three-layer

particleboards. European Journal of Wood and Wood Products, 70(1):357-359.

Torquato, S. (2002) Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic

Properties. Springer-Verlag, Vol. 16 pp. XXI, 703.

Poster A21

Contribution à l'identification des signatures acoustiques des différents mécanismes de fissuration dans le bois

MOUTEMBE Bienvenu[1], DIAKHATE Malick[2], MOUTOU PITTI Rostand[3,4]

[1]Univ. Sciences et Techniques de Masuku, Ecole Polytechnique de Masuku, Franceville, Gabon
[2]Univ. Bretagne Occidentale, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29600 Morlaix France
[3]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont Ferrand, France
[4]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
malick.diakhate@univ-brest.fr

Mots clefs : Bois ; Emission acoustique ; Mécanique de la rupture ; Classification non supervisée ; Propagation fissure

Contexte de l'étude et objectifs

La réduction des gaz à effet de serre est une problématique de plus en plus préoccupante, et en particulier au sein de la communauté scientifique. Dans cet objectif, le développement des structures bois dans les constructions civiles demeure une solution prometteuse dans la mesure où elles fixent durablement les gaz à effet de serre (GES). Cependant, du fait du comportement anisotrope du bois, de la distribution aléatoire des nœuds, et sous les actions combinées des sollicitations mécaniques et environnementales, l'ingénierie des structures bois nécessite de mieux comprendre le comportement thermo-hygro-mécanique du matériau bois.

La fissuration du matériau est une des causes principales de la ruine des structures. Afin d'anticiper ces désordres structurels, les concepteurs ont besoin de disposer d'outils leur permettant d'évaluer ces risques. Ainsi, le développement de méthodes à la fois de détection et de suivi de la propagation de fissure dans le bois peut apporter une contribution lors des phases de diagnostique structurelle des ouvrages en bois (Diakhate et al. 2017-b).

L'objectif de ce travail est de proposer des outils de détection de la propagation du front de fissure dans le bois, et sous différentes conditions climatiques (variation d'hygrométrie).

Matériel et méthodes

Des essais de fissuration en mode d'ouverture ont été réalisés en laboratoire sur des éprouvettes DCB (Double Cantilever Beam) à inertie variable (Fig.1-a) de bois de Douglas, à température ambiante, et à deux niveaux d'humidité interne. Deux techniques d'instrumentation ont été utilisées pour analyser le comportement mécanique de l'éprouvette DCB : la stéréo corrélation d'images numériques pour analyser les champs de déplacement et de déformation en surface de l'éprouvette, et l'émission acoustique pour détecter et localiser en temps réel les différentes fissures qui naissent dans le volume de matériau. Différentes méthodes d'analyse statistique des données acoustiques sont proposées afin d'identifier la signature acoustique associée à la propagation du front de fissuration. L'influence des conditions climatiques subies par le bois sur la signature acoustique du front de fissure est analysée.

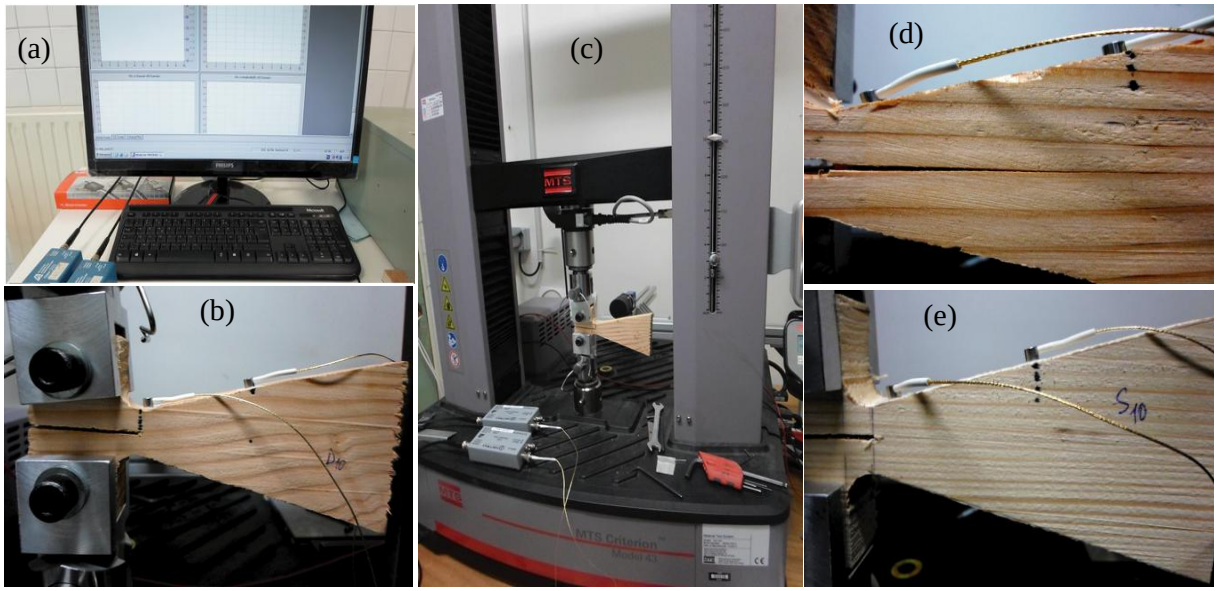


Fig. 1: Matériaux, éprouvette DCB, configuration expérimentale : (a) Equipement acoustique – (b) Eprouvette DCB (Douglas) instrumentée – (c) machine d'essai – (d) propagation de fissure pendant l'essai – (e) Eprouvette DCB (Sapin blanc) instrumentée

Résultats expérimentaux et numériques

Différentes méthodes d'analyse statistique (Diakhate et al. 2017-a) sont proposées pour identifier les différents mécanismes de fissuration. Les résultats de la corrélation d'images numériques sont analysés et comparés à l'évolution de l'activité acoustique. Le suivi par émission acoustique de la propagation du front de fissure a également permis d'évaluer l'évolution du taux de restitution d'énergie au cours de l'essai de fissuration en appliquant la méthode de la complaisance. Ces résultats expérimentaux (longueur de fissure, taux de restitution d'énergie) ont été comparés à ceux issus de la simulation numérique. Une perspective à long terme consisterait à appliquer ces méthodes sur du bois afin de minimiser les coûts liés au séchage du bois dans la construction.

Références

Diakhate M., Bastidas-Arteaga E., Moutou Pitti Rostand, Schoefs F. (2017) Cluster Analysis of Acoustic Emission Activity within Wood Material: Towards a Real-Time Monitoring of Crack Tip Propagation. Engineering Fracture Mechanics 180 (July): 254–67.

Diakhate M., Angellier N., Moutou Pitti R., Dubois F. (2017) On the crack tip propagation monitoring within wood material: cluster analysis of acoustic emission data compared with numerical modelling. Construction and Building Materials, http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.065

Poster A22

Variabilité spatiale des contraintes et modules en compression pour des poutres de bois de Moabi du Gabon

NSOUAMI Valérie[1], MANFOUMBI Nicaise[2], BASTIDAS-ARTEAGA Emilio[3], MOUTOU PITTI Rostand[4,5], DIAKHATE Malick[6]

[1]Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET), BP 3989, Libreville, Gabon
[2]Université des Sciences et Techniques de Masuku, Franceville, Gabon
[3]UBL, Université de Nantes, GeM, CNRS UMR 6183/FR
[4]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Clermont-Ferrand, France.
[5]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon
[6]Univ. Bretagne Occidentale, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29600 Morlaix France
nsouamijeanj@yahoo.fr

Mots clefs : Variabilité spatiale ; Durabilité ; Paramètres physico-mécaniques ; *Baillonella toxisperma*.

Contexte et objectifs

L'étude du comportement des bois tropicaux dans leur environnement est un véritable challenge pour la prédiction des réponses structurales des ouvrages en bois tropicaux soumis à des chargements thermo-hygro-mécaniques (Manfoumbi et al, 2016). La présente étude s'intéresse au comportement mécanique des poutres de bois de Moabi soumis à un fluage de longue durée (de 2009 à 2018) dans deux environnements (climatisé et extérieur non abrité) en milieu tropical. L'objectif à long terme de ce travail est d'évaluer l'influence de la variabilité spatiale des paramètres physico-mécaniques (module d'élasticité, résistance de rupture en compression) dans la réponse structurale donc dans la fiabilité des poutres avec ou sans fissures. Cette communication présente les premiers résultats concernant la variabilité spatiale de la résistance à la compression.

Matériel et Méthodes

Les éprouvettes des présents essais sont extraites de deux poutres en bois de Moabi (*Baillonella toxisperma)* (89 x 176 x 3090 mm^3) précédemment soumises à un essai de fluage en ambiance tropicale extérieure non abritée et en ambiance climatisée pendant 9 ans (Fig 1, Manfoumbi et al, 2012). Les poutres sont sciées en neuf tronçons de 340 mm de long. Les tronçons sont également subdivisés en trois portions dans le sens de la hauteur (haut, médian et bas), Fig. 2. De chaque portion, on extrait deux éprouvettes de flexion, deux éprouvettes de traction et quatre de compression. On obtient ainsi, les éprouvettes de la Fig. 2b. Seuls les essais de compression menés avec le dispositif montré dans la Fig. 2c (216 éprouvettes de section 20 x 20 mm^2 pour 120 mm de long) sont présentés dans ce travail.

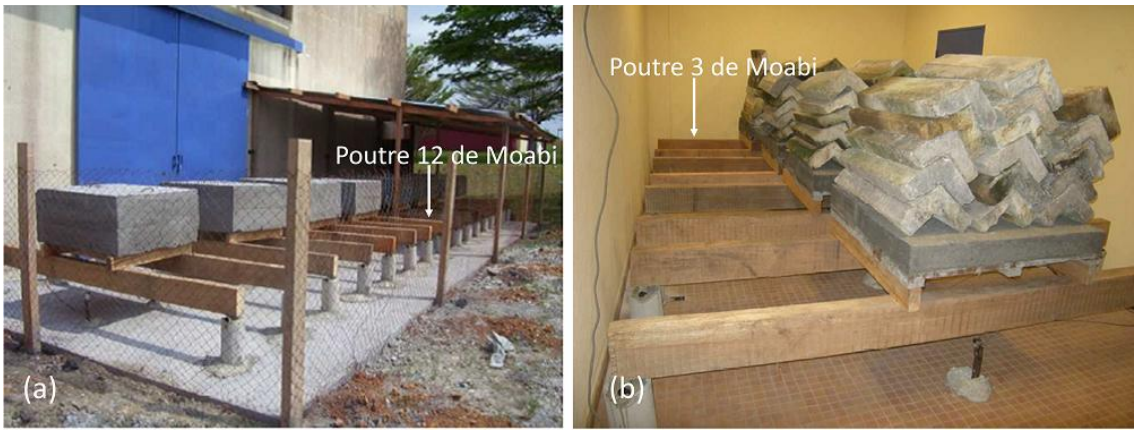


Fig.1 : (a) Environnement extérieur non abrité. (b) Environnement climatisé

Fig. 2. (a) Dégauchissage de la poutre. (b) Eprouvettes pour la caractérisation e la variabilité spatiale. (c) Dispositif expérimental d'essai de compression.

Résultats

La détermination de la résistance à la rupture lors des essais destructifs en compression ainsi que le calcul des modules d'élasticité (4081 à 10543MPa) et la contrainte (18,07 à 52,18 MPa) correspondant ont été réalisés selon la norme NF EN 408 et sont présentés dans les Figs. 3 et 4. On constate que les valeurs des moyennes de ces paramètres sont inférieures à celles présentes dans la littérature (contrainte 74 ±10 MPa et module 21040 ±2630 (Cirad, 2011**),** (contrainte 57 à 84 MPa et module 15100MPa (Prota, 2008) et (contrainte 76±5MPa et module 18300±4330MPa (Manfoumbi, 2012). Il existe une véritable variation des paramètres tout le long de la poutre. On remarque par exemple que parmi les contraintes en partie basse de la poutre 12 sont plus élevées aux tronçons 4 (1360mm) et 6 (2040mm) (charge) et au tronçon 8 (2720mm) que celles en partie médiane et haute à l'extrémité de gauche de la poutre mais reste sensiblement voisines en son milieu. Le constat est également le même pour la poutre 3 c'est-à-dire aux tronçons 1 (340mm) (appui) aux tronçons 2 (680mm) et 3 (1020mm). On remarque également que les modules de la poutre 3 de l'environnement climatisé sont plus élevés en partie haute aux tronçons 2 (680mm), 3 (1020mm), 4 (1360mm) (charge) et 7 (2380mm) puis en partie médiane aux tronçons 5 (1700mm), 6 (2040mm) (charge) et 8 (2720mm) que la partie et basse. Dans l'ensemble, les modules de la poutre 3 de l'environnement climatisé sont plus élevés que ceux de la poutre 12 de l'environnement

extérieur non abrité. Ces valeurs sont peut-être dues au vieillissement et à la durée de chargement de la poutre. A propos des valeurs des paramètres inférieurs de la poutre 12, ils peuvent se justifier peut-être par le fait qu'elles furent exposées pendant longtemps aux intempéries du milieu tropical. Les paramètres compilés par type de tronçon sont représentés sur les Figures 3 et 4 en fonction de la position spatiale de l'échantillonnage.

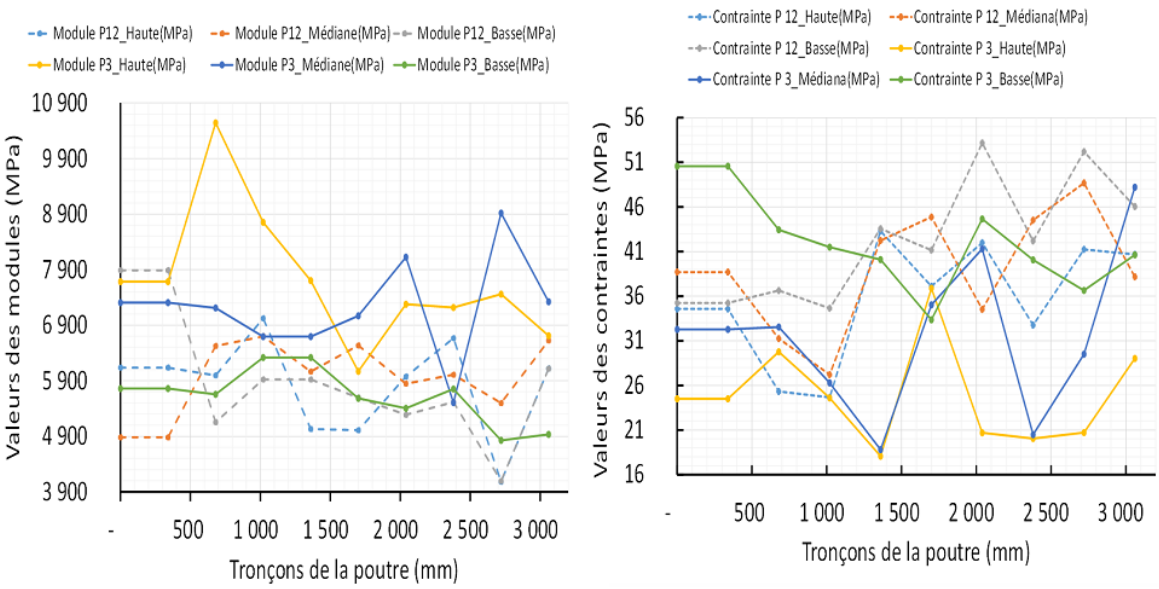


Fig.3. Représentation des modules et des contraintes des éprouvettes des poutres 12 et 3

Conclusion et Perspectives

Le travail proposé correspond à la première partie de phase expérimentale d'un vaste projet en cours de réalisation. Les futurs résultats intégreront les six poutres de trois environnements (climatisé, extérieur non abrité et extérieur abrité en milieu tropical) et des caractérisations mécaniques en compression, en flexion et en traction. Toutefois, les résultats obtenus sur cette première phase serviront de base de données pour caractériser et puis générer des « champs aléatoires » en tenant compte des incertitudes et de la variabilité spatiale de ces paramètres. Elles seront ensuite utilisées comme des entrées dans des modèles de fluage pour étudier les effets de la variabilité spatiale dans la réponse mécanique et la fiabilité des poutres. Ces modèles, une fois réalisés, peuvent être couplés aux mesures des flèches de poutres avec défauts obtenues dans le cadre du projet ANR CLIMBOIS et au Gabon.

Remerciements

Les auteurs remercient les dirigeants de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF) du Gabon pour le Laboratoire de mécanique et le logement mis à leur disposition.

Références

AFNOR, NF EN 408 (2009) Structures en bois – Bois de structure et bois lamellé-collé – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, AFNOR.

Avellaneda G., Manfoumbi N., Emilio Bastidas E., Moutou Pitti R. Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des bois tropicaux. 6èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Nantes, 21-23 novembre 2017.

CIRAD, (2011). Département Forêts, « TROPIX 5.0 : Caractéristiques technologiques de 215 essences tropicales », *Edition CIRAD*.

Ghanem R G, and Spanos P D. (1991). *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*. New York, USA: Springer.

Manfoumbi N (2012). Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement. Thèse de doctorat : génie civil. Limoges : Université de Limoges, 2012.http://epublications.unilim.fr/theses/2012/manfoumbi-boussougou-nicaise/manfoumbiboussougou-nicaise.pdf.

Manfoumbi Nicaise., Nsouami Valérie., Moutou Pitti R.., Bastidas-Arteaga E. Variabilité spatiale des paramètres physico-mécaniques des poutres en bois tropical soumis à un fluage de longue durée en milieu tropical naturel. 5 èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Bordeaux, 8-10 novembre 2016.

PROTA, (2008). (Plant Ressources Of Tropical Africa), « Ressources végétale de l'Afrique tropicale 7(1) : Bois d'œuvre 1 », PROTA, Backhuys Publishers, CTA, Pays-Bas, 2008, 785 p.

Session Poster B

B01 : Valorisation de coproduits de la transformation industrielle de l'Acajou (K. Ivorensis A. Chev), Bikoro Bi Athomo Arsène 117

B02 : Etude du comportement thermique des tanins d'aubier du bois d'okoumé, Engozogho Anris Starlin Peguy et al. 121

B03 : Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale, Frances Manon et al. 124

B04 : Elimination des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par adsorption sur des mousses bio-sourcées à base de tanins et de lignines, Issaoui Hamed et al. . . . 127

B05 : PALISSANDRES – Comprendre les liens botanique-chimie-mécanique-usages ayant déterminé le statut mondial de " bois précieux " du genre pantropical menacé Dalbergia, Brémaud Iris et al. 130

B06 : Modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois pour la conception mécanique, Burgers Agnès et al. 134

B07 : Beyond " clear wood " : exploring the structure-properties of figured woods and of woods with strong gradients selected in craftsmanship, Hu Hsien-Tsung et al. 138

B08 : Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent, Alkadri Ahmad et al. 141

B09 : Présentation d'un projet PEPS CNRS : GREENWOOD, Bardet Sandrine et al. 145

B10 : Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites, Dupleix Anna et al. 149

B12 : Étude expérimentale du transfert de liquide dans le bois de chêne de tonnellerie par imagerie à rayons X, Roussey Claire et al. 153

B13 : Nanometrology of Populus plant cell walls: Toward plant morphogenesis under abiotic stress, Normand Aubin et al. 157

B14 : Diagnostic mécanique par mesures vibratoires à l'échelle de l'arbre de l'efficacité et de la pérennité de la fonction de protection des forêts, Cros Vivien et al. 160

B16 : Caractérisation 3D multi-échelle de la microstructure du liège aggloméré, Le Barbenchon Louise et al. 163

B17 : Propriétés des fissures lors du déroulage du hêtre en fonction de la température et de la pression, Jérôme Alteyrac et al. 167

B18 : Les conséquences du procédé de fabrication sur les propriétés des panneaux contreplaqués, Vidal Marcia et al. 171

B19 : Influence de l'anisotropie lors du fraisage de produits d'ingénierie bois, Curti Rémi et al. 175

B20 : Etude de la production de carrelets de menuiseries en LVL chêne des chênes de qualité secondaire issus de la ressource locale, Besseau Benoît et al. 178

B21 : Etude expérimentale par corrélation d'images des propriétés de cisaillement de voile de panneaux de contreplaqués en hêtre, Viguier Joffrey et al. 182

B22 : Optimisation du temps de chauffe de billons en vue de leur déroulage, Frayssinhes Rémy et al. 186

Poster B01

Valorisation de coproduits de la transformation industrielle de l'Acajou (*K. Ivorensis A. Chev*)

BIKORO BI ATHOMO Arsène[1,2], EYMA Florent[3], SAFOU-TCHIAMA Rodrigue[2], CHARRIER Bertrand[1]

[1] CNRS/ Univ Pau & Pays Adour, Institut des Sciences Analytiques et Physico-Chimie pour l'Environnement et les Materiaux- Xylomat, UMR5254, 40004, Mont de Marsan, France.
[2] Laboratoire de Recherche et de Valorisation du Matériau Bois (LaReVa Bois). Ecole Doctorale des Grandes écoles. BP. 3989, Ecole Nationale Normale Supérieure de l'Enseignement Techniques (ENSET), Cap-Estérias (Gabon).
[3] Unité de Recherche ICA Composite, Unité de Recherche Productique Bois, Tarbes, France.
arsene.bikoro-bi-athomo@univ-pau.fr

Mots clefs : aubier ; bois de cœur ; écorce ; RP_HPLC ; LC-MS ; TGA ; DSC; sciures ; tanins.

Contexte et objectifs

La Forêt recouvre plus de 86% du territoire gabonais et représente une grande diversité d'essences tropicales valorisables. Si l'okoumé reste l'essence la plus abondante, d'autres essences comme l'acajou sont aussi exploitées pour la qualité de leur bois. Les produits industriels proviennent principalement de la première transformation. Cette dernière génère beaucoup de déchets (environ 50% du bois transformé) tels que : les sciures (déchet le moins valorisé) et les autres produits connexes (Ekomy Ango and Moutou Pitti, 2017). Depuis 2009, l'Etat gabonais a décidé de moderniser son industrie forestière afin de se positionner parmi les leaders africains avec des produits made in Gabon. Ainsi, des stratégies de développement ont été mise en place ; notamment celle de la valorisation des coproduits. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de recherche qui consiste tout d'abord à analyser la nature des différents coproduits de l'acajou afin de pouvoir envisager plusieurs voies de valorisation. Dans ce résumé, nous présentons quelques travaux réalisés depuis le démarrage de la thèse.

Matériel et méthodes

Nous avons étudié quatre échantillons d'acajou dont nous avons séparé les écorces, l'aubier et le duramen. Après leur broyage (à 60 mesh), nous avons réalisé des extractions (Méthanol/H_2O) ainsi que des extractions en milieu fortement alcalin (Chupin et al., 2015). Les extraits obtenus au méthanol ont été directement analysés par HPLC puis par LC/MS. Les autres extraits ont été séchés (105°C) et analysés par ATG et DSC.

Résultats

La LC/MS et l'HPLC nous ont permis de mettre en évidence la présence de tannins condensés avec des familles en UV-Vis qui absorbent entre 229 nm et 310 nm (λ_{max}). Nous avons également observé une forte présence de fragments de tannins hydrolysables, des oligomères de tannins condensés ainsi qu'une forte récurrence de composés aromatiques de type acide p-hydroxybenzoïque (fig. 1 & 2). Aussi, les analyses thermiques révèlent une Tg à 107°C (fig.4) et des températures de dégradation supérieures à 250°C (fig.5).

Ces résultats d'optimisation de séparation et d'identifications des polyphénols des extraits de l'acajou du Gabon sont originaux et permettent d'envisager des voies de valorisation pour des molécules à forte valeurs ajoutés.

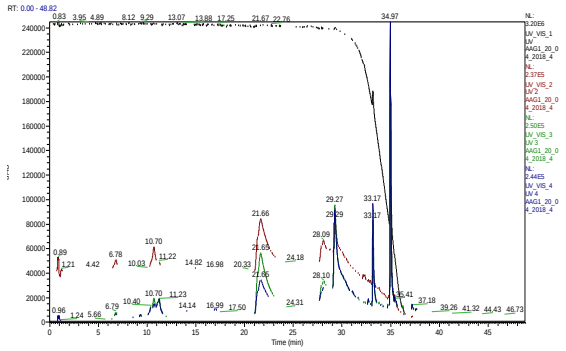


Fig.1 : Spectre uv-vis seul

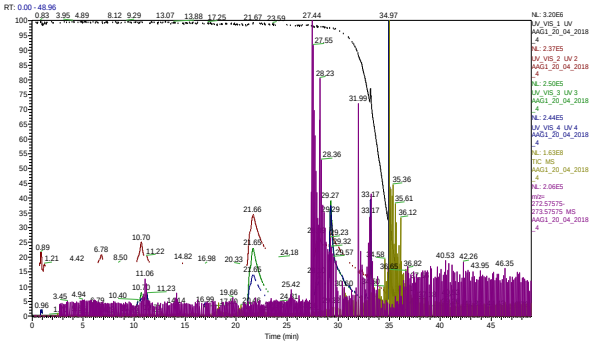


Fig.2 : Spectre uv-vis/ms Fisetinidine

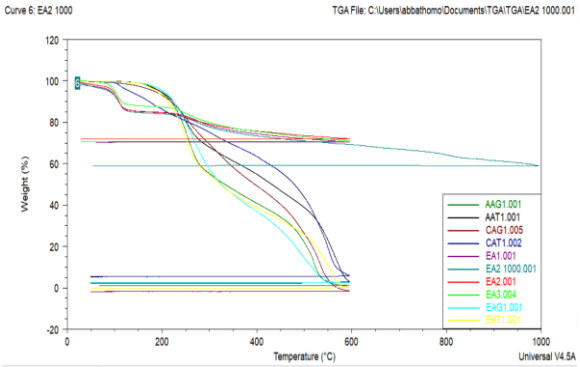


Fig.3 : Analyse thermogravimétrie/acajou

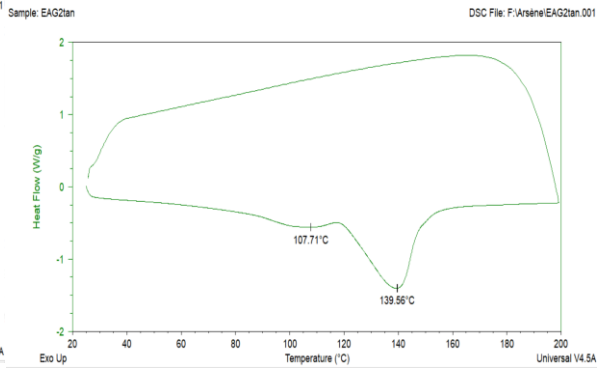


Fig.4 : Differential scanning calorimetry

Conclusion et Perspectives

Ce travail de valorisation nous a permis d'optimiser la séparation des polyphénols par la séparation chromatographique de l'acajou du Gabon. Il en ressort que les extrait de cette essence sont riche en fragment d'acide p-hydroxybenzoïque et de fisetinidine (Bikoro Bi Athomo et al., 2018). Par ailleurs, les courbes thermogravimétriques de l'acajou montrent deux pertes de masses caractéristiques. La première correspond au départ d'eau et la seconde au point de dégradation des tannins (266°C). La mise en évidence de ces molécules ouvre une voie pour la valorisation des extraits d'acajou dans l'industrie de la biomasse.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de l'Agence Nationales des Bourses du Gabon (ANBG), de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA). Nous remercions aussi Xyloforest pour les équipements d'analyse (ANR-10-EQPX-16 Xyloforest/Xylomat, Mont de Marsan) mis à notre disposition.

Références

Bikoro Bi Athomo, A., Engozogho Anris, S.P., Safou-Tchiama, R., Santiago-Medina, F.J., Cabaret, T., Pizzi, A., Charrier, B. (2018) Chemical composition of African mahogany (K. ivorensis A. Chev) extractive and tannin structures of the bark by MALDI-TOF. Ind. Crops Prod. 113, 167–178. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.013.

Chupin, L., Maunu, S.L., Reynaud, S., Pizzi, A., Charrier, B., Charrier-EL Bouhtoury, F. (2015) Microwave assisted extraction of maritime pine (Pinus pinaster) bark: Impact of particle size and characterization. Ind. Crops Prod. 65, 142–149.

Ekomy Ango, S., Moutou Pitti, R. (2017) caractéristiques mécaniques et thermiques d'une brique d'argile à base de sciure de bois du Gabon. GDR 3544 « Sci. Bois » 38–39.

Poster B02

Etude du comportement thermique des tanins d'aubier du bois d'okoumé

ENGOZOGHO ANRIS Starlin Peguy[1,2], SAFOU-TCHIAMA Rodrigue[2], DENAUD Louis[3], VIDAL Marcia[4], CHARRIER Bertrand[1]

[1]CNRS/ Univ Pau & Pays Adour, Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux - Xylomat, UMR5254, 40004, Mont de Marsan, France
[2]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon.
[3]Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédé, Arts et Métiers, Cluny, France
[4]Ecole Catholique d'Arts et Métiers ECAM - Lyon
engozogho-anris.st@univ-pau.fr

Mots clefs : Aucoumea Klaineana Pierre (Okoumé); DSC; Polyphenols; Tanins condensés; TGA

Contexte et Objectifs

Aucoumea klaineana est un grand arbre dioïque de la forêt tropicale guinéo-congolaise qui possède une aptitude remarquable au déroulage. L'utilisation de cette essence repose principalement sur la production de placages pour l'industrie du contreplaqué. Par ailleurs, des recents travaux ont montré que cette essence possèdait des propriétés autres que celle connu il ya une cinquantaine d'année. Peu de travaux ont été réalisés sur la composition chimique de ce bois. En 2014, Renimel et Andre montrèrent que la résine d'Okoumé présentait des propriétés intéressantes en cosmetique, en pharmaceutique et plus particulièrement en dermatologie. Des monomères de phenols presents dans l'huile essentielle d'Okoumé seraient également à l'origine de cette propriété. Plus récemment, les travaux de Koudou et al. (2014) Van den Bulcke et al. (2011) ont montré que l'Okoumé possédait des propriétés antifongiques. Au regard des connaissances limité3 es sur les propriétés de l'Okoumé il apparait important de mieux étudier ce bois afin d'améliorer la valorisation des co-produits de sa transformation industrielle.

Matériel et Méthodes

Les échantillons d'Okoumé proviennent de quatre arbres issus de trois zones géographiques, pour lesquels ont été analysées les sciures (60 mesh) d'aubier (Fig. 1). Ces sciures ont été utilisées pour l'extraction des polyphénols afin d'analyser leur comportement thermique; Deux dispositifs d'analyse : Analyse thermogravimétrique et analyse par calorimétrie différentielle à balayage ont été employés pour la caractérisation des polyphénols. Les analyses ont été conduite sous air de 25 à 600°C, avec une rampe de 10°C/min.

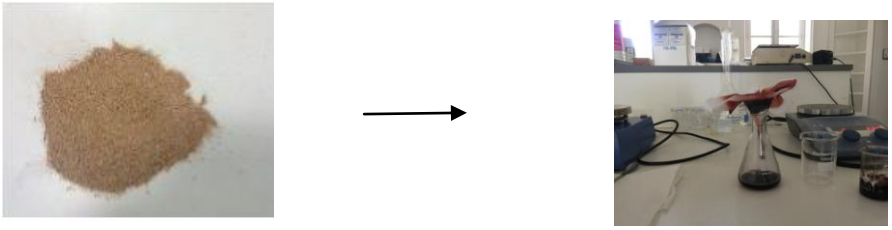


Fig. 1 : Extraction des polyphénols de la scuire d'OKoumé

Résultats

Les résultats obtenus ont montré dans un premier temps une variabilité de dégradation des tanins d'Okoumé en fonction des échantillons étudiés. Les pics à 113°C pour le bois issu de la concession forestière de Milolé (sud du Gabon) et 123°C pour le bois issu de la concession forestière de Mindzik (Nord du Gabon), seraient reliés au départ d'eau et de certains composés volatils. Par ailleurs, les tanins commencent à se dégrader à partir de 241°C (20%) pour Milolé et 253°C (15%) pour Mindzik. Ces températures pourraient correspondre à la décarboxylation des tanins (Saad et al., 2014) ou conduire à la formation d'une fraction catéchine et catéchol (Saad et al., 2014). Gaugler and Grigsby (2009) montrèrent que la catéchine se dégrade entre 250 and 315°C.

De plus, les tanins d'okoumé sont plus stables à la température que les tanins commerciaux analysés dans les même conditions d'études il s'agit des tanins de mimosa, de quebracho et de pin maritime qui se décomposent respectivement à 146°C, 145°C et 130°C.

Les analyses DSC (Fig. 2) ont été réalisées sur des échantillons de tanin d'okoumé pour déterminer la composition en température. La Fig. 2 montre que les tanins d'Okoumé présentaient plus le phénomène d'endothermie à 140°C environ attribué au départ d'eau associée. En chauffant davantage, les processus de dégradation n'ont révélé qu'un faible phénomène exothermique à 175°C.

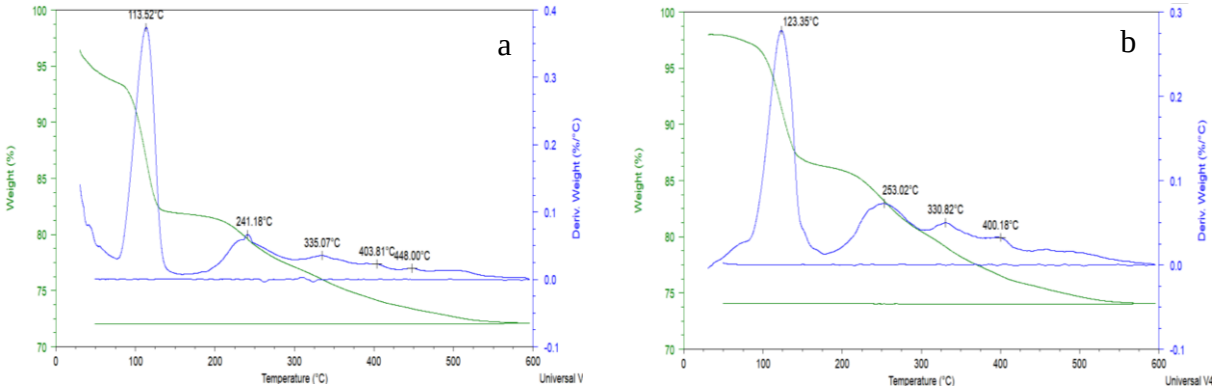


Fig. 2 : Analyse thermogravimétrique des tanins d'aubier d'Okoumé (a =Milolé ; b=Mindzik)

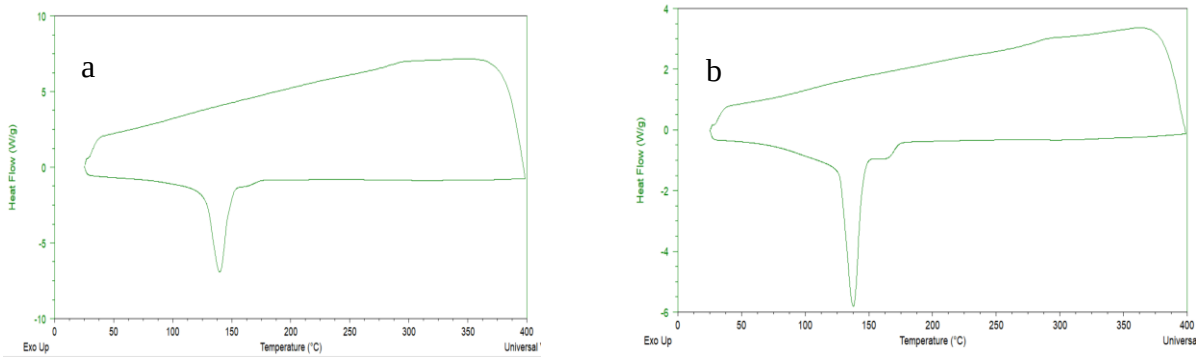


Fig. 3 : Analyse calorimétrique différentielle des tanins d'aubier d'Okoumé (a =Milolé ; b=Mindzik)

Conclusion et perspectives

Les tanins d'okoumé sontrelativement stables et pourraient être utilisé pour la mise en place de composites bio-sourcés adaptables en zones tropicales. Ce travail ouvre la voie à la possibilité de développer des adhésifs à partir d'extraits d'Okoumé.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endoit de l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG), de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) et à l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST pour l'équipements d'analyse mise à disposition.

Références

Gaugler, M., Grigsby, W.J., 2009. Thermal Degradation of Condensed Tannins from Radiata Pine Bark. J. Wood Chem. Technol. 29, 305–321.

Koudou, B., 2014. Elimination of lymphatic filariasis: The endgame and challenges for meeting the 2020 target. International Journal of Infectious Diseases, Volume 21, 42

Renimel, I., Andre, P., 2004. Use of an okume resin extract in the cosmetic and pharmaceutical fields, and in particular in the dermatological field.

Saad, H., Khoukh, A., Ayed, N., Charrier, B., Bouhtoury, F.C.-E., 2014. Characterization of Tunisian Aleppo pine tannins for a potential use in wood adhesive formulation. Ind. Crops Prod. 61, 517–525.

Van den Bulcke, J., De Windt, I., Defoirdt, N., De Smet, J., Van Acker, J., 2011. Moisture dynamics and fungal susceptibility of plywood. Int. Biodeterior. Biodegrad. 65, 708–716.

Poster B03

Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale

FRANCES Manon[1], CHARRIER Bertrand[1]

[1]Xylomat, IPREM-EPCP, UPPA, Mont de Marsan
manon.frances@univ-pau.fr

Mots clefs : colophane, formulation, huile végétale, pin, vernis

Contexte et objectif

Le sujet de cette thèse est l'étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale. Le but est de développer l'utilisation de la colophane issue de la résine de pin maritime pour fabriquer un vernis en se basant sur la connaissance des savoir-faire anciens (Tirat 2016). Nous nous sommes intéressés aux vernis employés à la fin du XVIIème et au début du XVIIIème siècle par le luthier Antonio Stradivari. Ses vernis d'une qualité exceptionnelle étaient obtenus à partir de colophane de pin et d'huile de lin (Echard 2010). La thèse consiste à s'inspirer de ces techniques anciennes pour fabriquer un vernis biosourcé industrialisable et de performances élevées. La thèse se déroule dans le cadre du projet collaboratif Stradivernis qui associe l'université de Pau, la cité de la musique (Paris), le FCBA, l'université de Créteil, les entreprises Holiste (Biscarosse), Concept Aquitaine (Bordeaux), Finsa (Morcenx) et Meubles Goisnard (Belin-Beliet) et l'association Api'Up (Capbreton).

Matériels et méthodes

Les matières premières utilisées sont de l'huile de lin crue de la marque Onyx et de la colophane issue de la résine de pin maritime de Biscarosse (Société Holiste, Landes).

Après séchage de la résine entre 120°C et 180°C, les mesures du taux de térébenthine résiduel dans la gemme sont réalisées avec un analyseur thermogravimétrique. Les huiles sont traitées thermiquement avec une plaque chauffante et la température réelle de l'huile est obtenue avec un thermocouple.

Les vernis sont ensuite formulés avec de l'huile de lin, de la colophane et des additifs et mélangés grâce à une plaque chauffante avec agitateur magnétique. Les formulations sont appliquées au pinceau et séchées avec des lampes UVA. Les couleurs des films sont mesurées avec un spectrocolorimètre de la marque X-rite, modèle Ci62. La brillance est mesurée avec un brillancemètre BYK Gardner modèle micro-gloss. La résistance à l'arrachement est mesurée avec un testeur d'adhérence à l'arrachement de la marque Positest, modèle TA.

Les analyses sont réalisées avec les appareils suivants : analyse calorimétrique différentielle par balayage TA instruments DSC Q20, analyseur thermogravimétrique TA instruments modèle Q500, HPLC DAD Ultimate 3000 Thermo Scientific et infra-rouge Perkin Elmer Spectrum One.

Résultats

Les expériences menées à ce jour se sont portées sur les traitements thermiques de l'huile de lin et leurs influences sur le film de vernis. Cinq traitements ont été testés : l'huile crue, deux

traitements thermiques inférieurs à 200°C, un rinçage de l'huile à l'eau avant un traitement thermique inférieur à 200°C, et une standolisation à 400°C.

Une chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) a été réalisée sur ces huiles afin de déterminer les différences en teneur de triglycérides. Les chromatogrammes de l'huile de lin crue et standolisée sont présentés en Fig. 1. Les pics n'ayant pas encore pu être identifiés, une chromatographie couplée à de la spectrométrie de masse est prévue à cet effet, les masses des triglycérides étant connues (Tirat 2016).

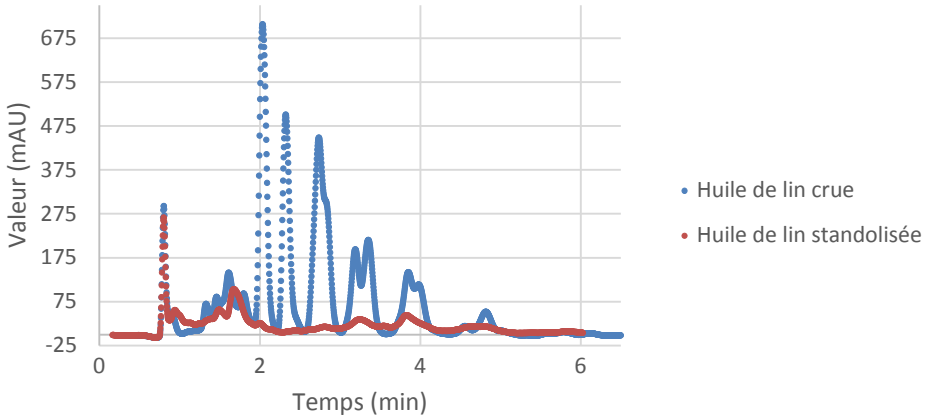


Fig. 1 : Chromatogrammes obtenus en HPLC pour l'huile de lin crue et standolisée

Quatre de ces huiles (une crue, deux avec traitements thermiques inférieurs à 200°C, et une avec rinçage de l'huile à l'eau avant un traitement thermique inférieur à 200°C) sont aussi analysées par DSC et ATG (Fig.2). L'analyse ATG montre une meilleure stabilité thermique pour les huiles traitées thermiquement.

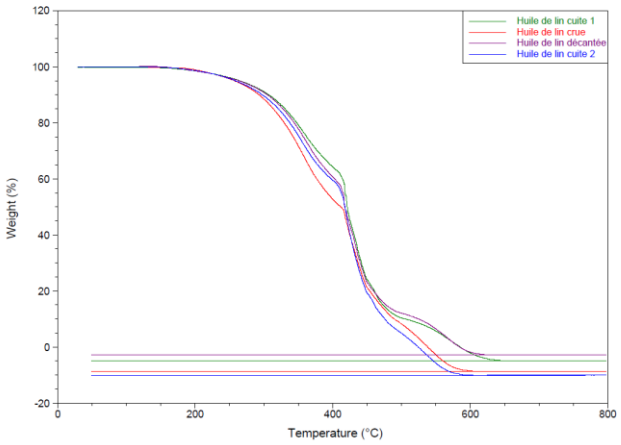


Fig. 2 : Perte de masse en fonction de la température obtenues par ATG pour l'huile crue et les huiles traitées thermiquement

Des vernis ont été formulés avec ces huiles (témoin : avec un traitement thermique inférieur à 200°C ; huile cuite : avec un traitement thermique inférieur à 200°C ; huile décantée : avec rinçage de l'huile à l'eau avant un traitement thermique inférieur à 200°C). La colophane est ajoutée pendant le chauffage des huiles. La résistance à l'arrachement (en psi), la couleur, la brillance et la résistance à l'acétone (notée de 0 (bon) à 5 (mauvais)) des films ont été

mesurées. Les résultats de résistance à l'arrachement et à l'acétone sont présentés en figure 3 et 4 respectivement.

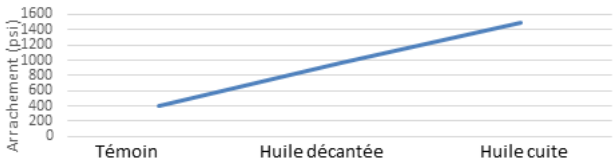


Fig. 3 : Résistance des films à l'arrachement (psi)

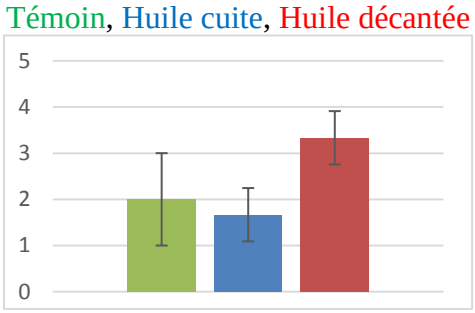


Fig. 4 : Résistance à l'acétone des films

Le traitement thermique de l'huile cuite semble amélioré la résistance à l'arrachement, tandis que le rinçage de l'huile décantée semble détériorer la résistance à l'acétone.

Remerciements

Nous remercions la région Nouvelle Aquitaine pour le financement à 50% de la thèse, ainsi que le conseil départemental pour le financement de 50% de la thèse également. Nous remercions aussi la comité d'agglomération du Marsan pour son aide au fonctionnement du laboratoire ainsi que l'ANR dans le cadre de l'Equipex Xyloforest / réseau Xylomat (ANR-10- EQPX-16 Xyloforest/Xylomat, Mont de Marsan).

Références

Tirat Sophie, Ilaria Degano, Jean-Philippe Echard, Agnès Lattuati-Derieux, Anna Lluveras-Tenorio, Arul Marie, Stéphane Serfaty, Jean-Yves Le Huerou (2016) Historical linseed oil/colophony varnishes formulations: Study of their molecular composition with micro-chemical chromatographic techniques, Microchemical Journal 126(mai):200-213. doi:10.1016/j.microc.2015.11.045.

Echard Jean-Philippe, Loïc Bertrand, Alex von Bohlen, Anne-Solenn Le Hô, Céline Paris, Ludovic Bellot-Gurlet, Balthazar Soulier, et al. (2010) The Nature of the Extraordinary Finish of Stradivari's Instruments. Angewandte Chemie International Edition 49(1): 197-201. doi:10.1002/anie.200905131.

Poster B04

Elimination des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par adsorption sur des mousses bio-sourcées à base de tanins et de lignines.

ISSAOUI Hamed[1], LAFAILLE Julie[2], CHARRIER – EL BOUHTOURY Fatima[1]

[1] CNRS/UPPA PAU & PAYS ADOUR/ E2S UPPA, Institute of Analytical Sciences and Physico-Chemistry for Environment and Materials (IPREM),
CNRS/UPPA PAU & PAYS ADOUR/ E2S UPPA, Institut des Sciences Analytiques et de Physicochimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM), IUT des Pays de l'Adour, 371 Rue de Ruisseau, 40004 Mont de Marsan, France
[2] UFR Sciences et Techniques, Département de Chimie - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Avenue de l'Université - 64013 – PAU
hamed.issaoui@univ-pau.fr

Mots clefs : Métaux lourds ; biosorption ; mousses biosourcées ; lignines ; tanins

Introduction

Les sources de pollution de l'environnement sont nombreuses et variées en raison de la diversité des activités industrielles, des matières utilisées et des procédés de fabrication. Parmi polluants engendrés par l'activité humaine figurent les métaux lourds. Ces derniers entrent dans la composition d'une grande variété de produits, mais ils sont dangereux pour la santé humaine et les écosystèmes car ils sont toxiques ou cancérigènes même à de très faibles concentrations (Farooq et al., 2010), (Fu and Wang, 2011). Par conséquent, la communauté scientifique et les industriels ont accordé une grande importance pour le traitement des eaux notamment celles contaminées par les métaux lourds. Une des techniques très fréquemment adoptées pour le traitement des eaux est l'adsorption. Son principe repose sur la capacité d'un adsorbant de fixer sur sa surface certains polluants tels que les métaux lourds. La biosorption par la biomasse est une biotechnologie particulièrement prometteuse pour l'élimination des métaux lourds grâce à sa simplicité, à la présence des groupements fonctionnels réactifs (hydroxydes, carboxyliques …) capables de réagir avec les métaux lourds, à la disponibilité de matières premières et à son faible coût (Sud et al., 2008). Jusqu'à présent, divers biosorbants à base de tanins (extractibles présents notamment dans les écorces et/ou bois des arbres) et de lignines (déchets de l'industrie papetière) ont été largement étudiés pour éliminer une grande variété d'ions métalliques (Bacelo et al., 2016) ; (Ge and Li, 2018). La majorité des biosorbants à base de tanins a été synthétisée en utilisant le formaldéhyde, un produit classé comme cancérigène par le Centre International de Recherche sur le Cancer ("Press Release N° 153,"). D'autres produits moins toxiques que le formaldéhyde, tel que le glyoxal et l'hexamethylènetetramine, ont été proposés dans la littérature comme des agents de réticulation de tanins ou de lignines (Chupin et al., 2015) ; (Merle et al., 2016).

Dans ce travail, nous avons étudié la rétention des ions (Cu2+, Zn2+, Pb2+ et Cd2+) par adsorption sur des mousses phénoliques bio-sourcées à base de tannins et de lignines. Ces mousses ont été préparées sans formaldéhyde par un processus de moussage mécanique. Il s'agit d'un nouveau matériau durable et riche en groupes phénoliques. Ces derniers offrent une affinité spécifique pour les ions des métaux lourds.

A notre connaissance, à ce jour aucune étude n'a été effectuée sur la rétention des métaux lourds sur des mousses bio-sourcées à base d'un mélange de tanins et de lignines.

Résultats

Le protocole expérimental utilisé pour déterminer le meilleur taux de rétention des ions métalliques (Cu2+, Zn2+, Cd2+ et Pb2+) sur des mousses bio-sourcées (M1, M2, M3 et M4) est le suivant: un morceau de la mousse de 0,3 g a été ajouté à une solution contenant un des ions Cu2+, Zn2+, Pb2+ ou Cd2+ de concentration de 50 ppm et du pH ajusté à 5,7 ; 7 ; 7 et 8 respectivement. Après un certain temps t d'agitation, les solutions ont été filtrées sur une membrane de 0,45 µm et le filtrat obtenu a été analysé par spectrométrie d'absorption atomique afin de déterminer les concentrations des ions métalliques restants à l'équilibre. Les rendements d'adsorption des métaux sur les mousses sont illustrés par la figure1.

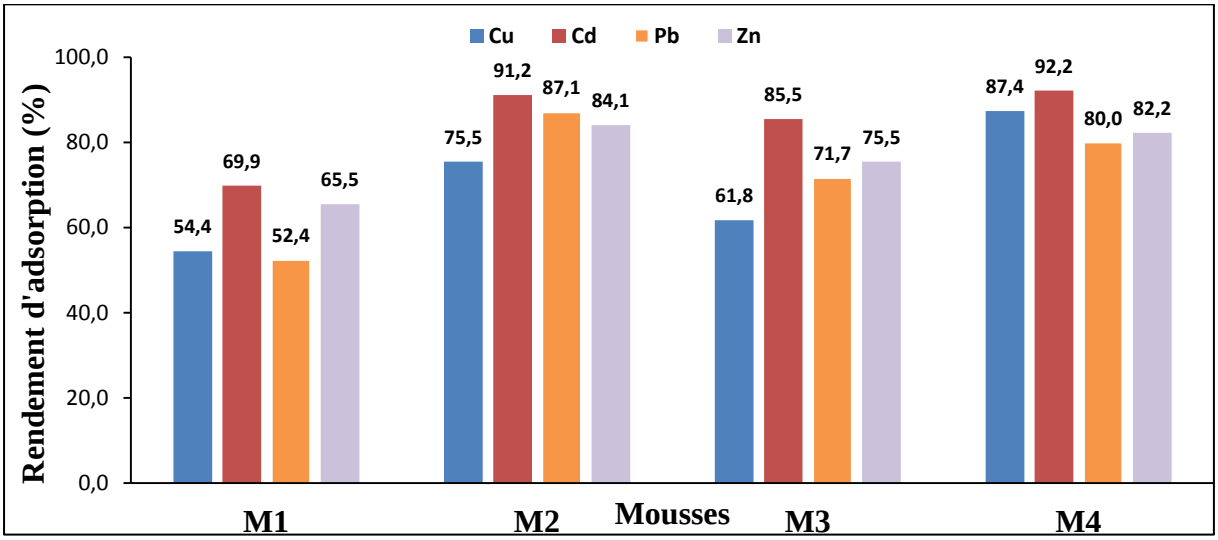


Fig. 1 : Rendement d'adsorption des métaux en fonction de formulation de mousses

Les quatre mousses présentent une capacité de rétention des métaux lourds comprise entre 52 et 92%. Le cuivre a été bien retenue sur la mousse M4 par un pourcentage de 87%. Le plomb a été bien fixé par sur la mousse M2 avec un rendement de 87%. Le cadmium et le zinc ont les mêmes affinités vis-à-vis les mousses M2 et M4, les pourcentages d'adsorption sont de 91% pour le Cd et de 82% pour le Zn.

Conclusion et perspectives

Des mousses phénoliques, à base de tanins et de lignines, écologiques et peu coûteuses ont été préparées. Elles ont été testées en tant que biosorbants pour l'élimination des métaux lourds (Cu2+, Zn2+, Cd2+ et Pb2+) présents dans des solutions aqueuses. Les premiers résultats obtenus sont prometteurs, ils montrent une capacité d'adsorption qui dépasse les 80 % pour la mousse M4.

Dans la suite de ce travail, vise à étudier l'effet de pH de la solution, de la concentration initiale en métal et du temps de mise en contact afin de modéliser l'isotherme et la cinétique d'adsorption.

Remerciements

Nous remercions le Conseil Départemental des Landes (CD40) pour son soutien financier ainsi que les entreprises Rayonier Advanced Materials (anciennement Tembec Avebene, Tartas 40, France), Tanac inc. et Silvateam qui nous ont fourni les matières premières.

Références

Bacelo H.A.M., Santos S.C.R., Botelho C.M.S., 2016. Tannin-based biosorbents for environmental applications – A review. Chemical Engineering Journal 303, 575–587.

Chupin L., Charrier B., Pizzi A., Perdomo A., Charrier-El Bouhtoury F., 2015. Study of thermal durability properties of tannin–lignosulfonate adhesives. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 119, 1577–1585.

Farooq U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M., 2010. Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – A review of the recent literature. Bioresource Technology 101, 5043–5053.

Fu F., Wang Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management 92, 407–418.

Ge Y., Li Z., 2018. Application of lignin and its derivatives in adsorption of heavy metal ions in water: a review. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 6, 7181–7192.

Merle J., Birot M., Deleuze H., Mitterer C., Carré H., Charrier-El Bouhtoury F., 2016. New biobased foams from wood byproducts. Materials & Design 91, 186–192.

Press Release N° 153, URL : https://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2004/pr153.html (accessed 9.14.18).

Sud D., Mahajan G., Kaur M.P., 2008. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. Bioresource Technology 99, 6017–6027.

Poster B05

PALISSANDRES – Comprendre les liens botanique-chimie-mécanique-usages ayant déterminé le statut mondial de « bois précieux » du genre pantropical menacé *Dalbergia*

BREMAUD Iris[1], LANGBOUR Patrick[2], THEVENON Marie-France[2], RAMANANANTOANDRO Tahiana[3], QUINTANAR ISAIAS Alejandra[4]

[1]CNRS, Equipe BOIS, LMGC, CNRS, UM, Montpellier
[2]CIRAD, BioWooEB, Montpellier
[3]Dpt des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antanarivo, Madagascar
[4]Dpt de Biologie, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (UAM), Mexique
iris.bremaud@cnrs.fr

Mots clefs : Bois précieux ; Bois tropicaux ; Propriétés mécaniques-vibratoires ; Chimie-Mécanique ; Liens Taxonomie-Physique ; Artisanat ; Facture instrumentale ; Diversité biologique et culturelle

Contexte socio-éco-environnemental

Les bois de Palissandres vrais (espèces du genre *Dalbergia*, famille des Fabaceae) représentent l'archétype des bois tropicaux précieux, emblématiques dans des usages culturels (artisanats d'art, facture d'instruments de musique, etc.) de différentes aires géoculturelles et différentes époques historiques, mais aujourd'hui menacés par une explosion de la consommation globale de type industrielle. Le genre pantropical *Dalbergia* compte environ 250 espèces (même si l'identification taxonomique n'est encore aujourd'hui pas complète). La plupart de ces espèces ont des usages culturels traditionnels très importants, autant dans les régions tropicales où poussent ces arbres (Ramananantoandro et al. 2013; Quintanar-Isaias & Pérez-Olvera 1994) que dans les zones tempérées où certains sont importés depuis des siècles (depuis l'époque Romaine pour le *D. melanoxylon* par exemple). Les bois de nombreuses espèces du genre *Dalbergia* se retrouvent notamment comme espèces majeures dans la fabrication d'instruments de musique des différents continents (Brémaud 2012), et sont devenu les matériaux « standards » de plusieurs instruments de la musique Occidentale (guitares, vents de la famille des bois, marimbas de concert, etc.), dont la forme classique et/ou moderne est issue d'évolutions de conception en lien avec les caractéristiques de ces matériaux. Mais depuis une vingtaine d'année, des importations à échelle industrielle (notamment vers la Chine pour du mobilier) se sont accélérées, de façon vertigineuse dans la dernière décennie. L'ampleur du problème est telle que, en plus de la menace sur la biodiversité, elle se traduit par des tensions géopolitiques et des graves atteintes à la sécurité dans plusieurs régions. Cette situation a poussé la CITES (Convention sur le Commerce International des Espèces Menacées) à inscrire l'ensemble du genre Dalbergia sur son Annexe II en Janvier 2017. Cette réglementation indispensable pour tenter de sauvegarder ces espèces, se répercute cependant au premier chef sur des artisans fortement dépendants de ces matériaux, qui sont très sensibles aux enjeux environnementaux et qui utilisent de très faibles volumes avec peu d'impact sur les ressources naturelles, mais qui se trouvent aujourd'hui « victimes collatérales » d'une surexploitation causée par une concurrence industrielle qui fait une consommation démesurée de ces bois précieux.

Etat de l'art scientifique

En dépit de l'importance culturelle et technique de ces bois, et de l'urgence en termes de conservation à la fois de la biodiversité et du patrimoine socio-culturel, il est surprenant de constater qu'il n'existe que très peu de données sur les propriétés physico-mécaniques et acoustiques des Palissandres. Par exemple, dans une fouille exhaustive de la littérature internationale on ne retrouve pas plus que 12 espèces (sur environ 250…) du genre *Dalbergia* déjà caractérisées (même très partiellement) pour leurs propriétés vibratoires (Brémaud 2008). Par ailleurs, dans une analyse à plus grande échelle des liens éventuels entre propriétés mécaniques et taxonomie (Brémaud et al. 2009), la famille des Fabaceae se démarque par des coefficients d'amortissement des vibrations (facteurs de perte) exceptionnellement faibles par rapport à toutes les autres familles botaniques étudiées, et cette caractéristique atypique est notamment entrainée par le genre *Dalbergia* (et genres proches, tribu des Dalbergioideae). Un petit nombre d'études concernent les particularités physiques des bois de *Dalbergioideae* (Yano et al. 1995, Traoré et al. 2010; Brémaud et al. 2011; Segla et al. 2015). Or, des facteurs de pertes exceptionnellement bas peuvent trouver leur explication dans une composition phytochimique (métabolites secondaires) particulière (Brémaud et al. 2010; SeGolpayegani et al. 2012). La phytochimie des bois de Dalbergia a été nettement plus étudiée que leurs propriétés physiques, ceci pour deux raisons : d'une part, la plupart de ces bois ont des activités phytopharmacologiques importantes (Saha et al. 2013); d'autre part, la composition en métabolites secondaires peut constituer un meilleur marqueur taxonomique des espèces à l'intérieur du genre Dalbergia, que la structure cellulaire anatomique. Ce dernier point pose d'ailleurs problème dans les efforts actuels de régulation du commerce international, et depuis que la thématique est devenue d'une actualité brulante, on voit apparaître d'assez nombreuses publications portant sur les méthodes d'identification de ces espèces dans une optique de recherche forensique.

Protocole d'analyse en démarrage

Un point crucial dans ce projet est l'obtention et le partage entre partenaires d'un échantillonnage aussi large que possible de différentes espèces du genre Dalbergia. Les trois sites (Montpellier, Madagascar, Mexique) disposent chacun d'une xylothèque, celles de Madagascar et de Mexico étant spécialisées sur les flores locales, celle du CIRAD à Montpellier comprenant 320 spécimens de 52 espèces de Dalbergia d'Asie, Afrique et Amérique. Ces ressources sont des collections et ne peuvent être analysées que par des méthodes absolument non-destructives. La collecte d'échantillons analysables par méthodes destructives (mesures vibratoires classiques, extractions chimique) impliquera les 3 laboratoires de recherche, avec accès à différentes espèces selon les pays. Cette phase est complexe, du fait des réglementations CITES en Europe, du fait d'un moratoire sur l'abattage des arbres de Dalbergia à Madagascar, et du fait de la fragmentation de l'habitat de ces espèces au Mexique, les populations restantes se trouvant dans des régions peu sûres. Des partenariats avec des artisans des 3 pays permettront en parallèle d'obtenir des échantillons provenant de leurs stocks de bois, et qualifiés à l'usage – mais qui devront être identifiés botaniquement.

Après une phase d'enquêtes auprès d'artisans pour relever leurs pratiques, perceptions et questionnements, il s'agira de tester des méthodes de caractérisation adaptées aux limitations géométriques et/ou de quantité dictées par la difficulté d'accès à la ressource. Le but est de produire des données de propriétés vibratoires (et si possible hygro-mécaniques) sur une large gamme d'espèces de *Dalbergia* (et *Dalbergiodeae*). L'effet d'extractions chimiques quantitatives sera testé sur quelques cas représentatifs. L'implémentation des résultats dans

les bases de données développées au LMGC et au CIRAD permettra de proposer des modèles statistiques sur des liens entre taxonomie et propriétés mécaniques, ainsi que de relier les données de taxonomie et de propriétés avec les usages traditionnels en facture instrumentale et artisanats des différents taxons considérés.

Lancement de réseau(x) et de projet(s) inter-disciplines, inter-métiers, inter-nationaux

Les questions scientifiques fondamentales, comme le contexte socio-éco-environnemental d'une actualité « brûlante », font du cas des Palissandres un système complexe. Pour l'aborder, il est indispensable d'échanger, et de prendre en compte les points de vue de différentes disciplines scientifiques, de différentes métiers et acteurs, de différentes aires bio-géo-culturelles. La problématique CITES fait que de nombreux groupes de travails institutionnels existent. Mais la dimension scientifique y est surtout présente dans une optique forensique, plutôt que de compréhension des phénomènes et mécanismes sous-jacents. Afin d'établir plus d'échanges et de créer des réseaux, le projet exploratoire en démarrage, présenté dans ce poster, associe LMGC et BioWooEB à Montpellier, Madagascar (Tahiana Ramananantoandro, Université d'Antananarivo), Mexique (Paz Alejandra Quintanar Isaias, UAM Mexico), et une association professionnelle de luthiers guitare (APLG). Les discussions en cours devraient rapidement ouvrir la voie à des projets de plus grande ampleur, combinant les questions scientifiques (physiques, taxonomiques, historiques et ethnobotaniques), et les enjeux actuels de co-conservation de la biodiversité et de la diversité socio-culturelle.

Remerciements

La phase préliminaire de ce projet, à l'échelle Montpelliéraine, a bénéficié du soutien de la Région Occitanie (ex. Languedoc-Roussillon) dans un projet « Chercheur(se)s d'Avenir ». Le projet exploratoire international en démarrage est supporté par le LabEx NUMEV (ANR-10-LABX-20).

Références

Brémaud, I. (2009). Propriétés vibratoires des bois de facture instrumentale et biodiversité. Musique et Technique 4 : 29-42.

Brémaud, I., Minato K. & B. Thibaut (2009). Mechanical damping of wood as related to species classification: a preliminary survey. 6th Plant Biomechanics Conference PBM09, 16-21 November 2009, Cayenne, French Guyana. B. Thibaut (ed). pp536-542.

Brémaud, I., K. Minato, P. Langbour & B. Thibaut. (2010) Physico-chemical indicators of interspecific variability in vibration damping of wood. Annals of Forest Science 67(7) : 707(8p)

Brémaud, I., N. Amusant, K. Minato, J. Gril & B. Thibaut (2011). Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). Wood Science and Technology 45(3) : 461-472

Brémaud, I. (2012) Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. Journal of the Acoustical Society of America 131(1) : 807-818

Quintanar Isaias, A., Pérez Olvera, C.d.l.P. (1994) El uso de las maderas en los instrumentos musicales. Contactos. 3:7-15.

Ramananantoandro, T., Ramanakoto, M.F., Rajemison, A.H., Eyma, F. (2013) Relationship between density and aesthetic attributes of wood and preference of Malagasy consumers. Annals of Forest Science. 70:649-658.

Saha, S., Shilpi, J.A., Mondal, H., Hossain, F., Anisuzzman, M., Hasan, M.M., Cordell, G.A. (2013) Ethnomedicinal, phytochemical, and pharmacological profile of the genus *Dalbergia* L.(Fabaceae). Phytopharmacology. 4:291-346.

Segla, K.N., Kokutse, A.D., Adjonou, K., Langbour, P., Chaix, G., Guibal, D., Kokou, K. (2015) Caractéristiques biophysiques du bois de *Pterocarpus erinaceus* (Poir.) en zones guinéenne et soudanienne au Togo. Bois et Forêts des Tropiques.51-64.

Se Golpayegani, A., Brémaud, I., Gril J., Thévenon M-F., Arnould O., Pourthamasi K. (2012) Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba* L.). Journal of Wood Science 58(2) : 153-152

Traoré, B., Brancheriau, L., Perré, P., Stevanovic, T., Diouf, P. (2010) Acoustic quality of vène wood (*Pterocarpus erinaceus* Poir.) for xylophone instrument manufacture in Mali. Annals of Forest Science. 67:815.

Yano, H., Kyou, K., Furuta, Y., Kajita, H. (1995) Acoustic properties of Brazilian rosewood used for guitar back plate. Mokuzai gakkaishi. 41:17-24.

Poster B06

Modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois pour la conception mécanique

BURGERS Agnès[12], MONTERO Cédric[1], ARNOULD Olivier[1], BRANCHERIAU Loïc[2], VINCHES Marc[3], MARCHAL Rémy[2]

[1]LMGC, Université de Montpellier, CNRS,
[2] Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), BioWooEB UPR CIRAD 114
[3]Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (LGEI), IMT Mines Alès
agnes.burgers@mines-ales.org

Mots clefs : caractérisation mécanique ; comportement hygroscopique ; modèles prédictifs ; NIRS ; pins ; variabilité.

Contexte et objectifs

Dans un contexte mondial de développement durable, les matériaux de structure (bâtiment, construction mécanique, emballage, etc.) représentent en tonnage la plus grande part des enjeux de substitution de matériaux « énergivores » par des matériaux biosourcés (Sathre et O' Connor, 2010). Pour ces usages non alimentaires, les bois apparaissent comme la principale source de biomasse utilisable et leur disponibilité potentielle est très grande dans les forêts françaises (Alexandre et al., 2012).

En prenant une logique de valorisation en cascade, au sein des bois massifs, des pièces de bois « sans défauts », peuvent être utilisées en génie mécanique en substitution à d'autres matériaux comme les métaux et les polymères.

Pour ce faire il faudrait être en mesure de fournir aux concepteurs une « fiche technique du matériau » précisant les caractéristiques physico-mécaniques nécessaires à la conception mécanique. À la différence des matériaux industriels, la variabilité due à l'origine naturelle des bois impose d'établir cette fiche technique « a posteriori », pour chaque pièce de bois, à partir de connaissances disponibles (espèce, origine, etc.) et de mesures adaptées non-destructives.

L'objectif de ce travail est de proposer des modèles prédictifs du comportement physico-mécanique de pièces de bois « sans défaut » à partir de mesures facilement reproductibles dans l'industrie.

Matériel et méthode

La démarche employée (Fig. 1) est la construction de modèles statistiques, permettant de prédire des données caractéristiques mesurées en laboratoire, à partir d'indicateurs facilement mesurables dans l'industrie.

Mesures de propriétés physico-mécaniques utiles aux concepteurs

Dans cette étude les propriétés suivantes ont été mesurées :

- la densité ;
- les modules d'élasticité et de cisaillement (suivant R,T et L), par mesures vibratoires (BING®) et par contact direct, afin de caractériser le comportement élastique ;
- la contrainte de rupture en compression dans le sens longitudinal par essai normalisé, comme indicateur de limite d'élasticité ;

- les variations dimensionnelles en fonction de l'humidité dans les directions radiale et tangentielle.

Les mesures de certaines propriétés élastiques et hygroscopiques étant destructives et/ou difficilement reproductibles dans le milieu industriel à ce jour, des modèles prédictifs ont été construits à partir d'indicateurs rapides à mesurer par des moyens non destructifs.

Mesures des indicateurs

Quatre indicateurs ont été retenus, car ils sont a priori représentatifs des processus d'adaptation de la genèse du bois aux conditions environnementales :

- la densité ;
- la largeur de cernes ;
- le module spécifique longitudinal mesuré par BING®, bien corrélé à l'angle des microfibrilles (Cave, 1968) paramètre clé de l'anisotropie du bois ;
- une empreinte spectrale en proche infrarouge (NIRS), comme indicateur de la chimie.

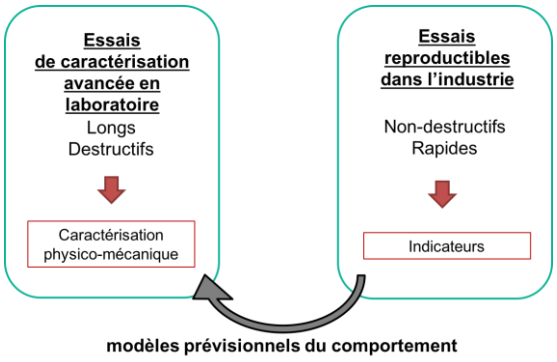


Fig. 1 : La démarche générale

Modèles statistiques

Dans un premier temps, les modèles prédictifs ont été réalisés seulement à partir des indicateurs physico-mécaniques. Ces modèles ont été élaborés par des régressions linéaires multiples, pas à pas (stepwise).

La deuxième étape s'est concentrée sur les prédictions à partir des spectres proche-infrarouge mesurés. Des modèles prédictifs ont été construits, selon une méthode de régression des moindres carrés partiels, couramment nommée par son abréviation anglaise, régression PLS (Bertrand 2005).

Enfin, des modèles globaux ont été élaborés. Afin de combiner les indicateurs physico-mécaniques et ceux issus de la NIRS, les indicateurs physico-mécaniques ont été ajoutés comme colonnes supplémentaires de la matrice des spectres de la NIRS.

Le matériel végétal

L'étude a été réalisée sur quatre espèces de pins parmi les six espèces les plus présentes en France métropolitaine : le pin sylvestre (Pinus sylvestris L.), le pin laricio (Pinus nigra subsp. laricio Maire), le pin maritime (Pinus pinaster Aiton) et le pin à crochets (Pinus mungo subsp.uncinata (Ramond ex DC.) Domin). Elles représentent 88 % du volume total des pins sur pied en France (Inventaire forestier national, campagnes de relevés entre 2005 et 2012).
Ces bois ont été récoltés dans trois départements de la région Occitanie sous forme de plateaux directement en scierie ou par l'intermédiaire du CIRAD.

Résultats et discussions

La construction des modèles prédictifs avec les indicateurs physico-mécaniques (densité, module spécifique longitudinal, et largeur de cerne), confirme que la densité est un bon prédicteur (Guitard et El Amri, 1987). Sa combinaison avec le module spécifique offre une meilleure prédiction. En revanche, il apparait que la largeur de cerne apporte peu dans l'amélioration des modèles prédictifs (sauf pour le module de cisaillement RT). Le point de saturation des fibres (PSF) n'est pas du tout prédit, avec les indicateurs utilisés (Fig. 2).

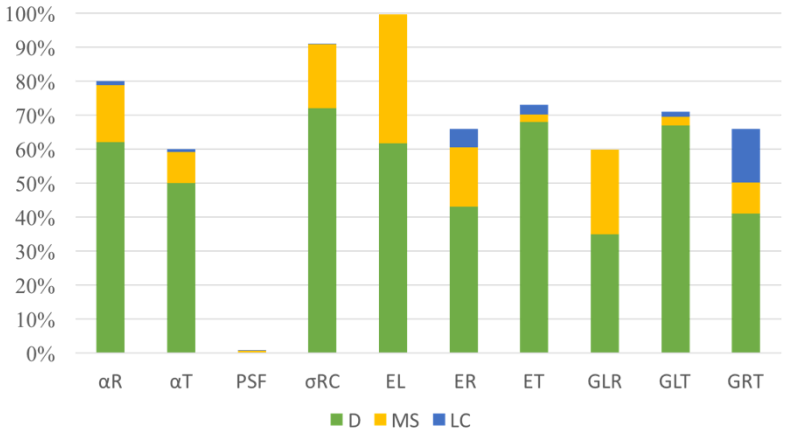


Fig. 2: Coefficients de détermination R^2 des modèles physico-mécaniques (Légende : D : Densité, MS : Module spécifique longitudinal, LC : Largeur de cerne, αR : Coefficient de retrait radial, αT : Coefficient de retrait tangentiel, PSF : Point de saturation des fibres, σRC : Contrainte de rupture en compression, EL : Module d'élasticité longitudinal, ER : Module d'élasticité radial, ET : Module d'élasticité tangentiel, GLR : Module de cisaillement LR, GLT : Module de cisaillement LT, GRT : Module de cisaillement RT)

Les modèles élaborés à partir des spectres proche infra-rouge donnent de meilleures prédictions que les indicateurs physico-mécaniques pour toutes les propriétés hygroscopiques.

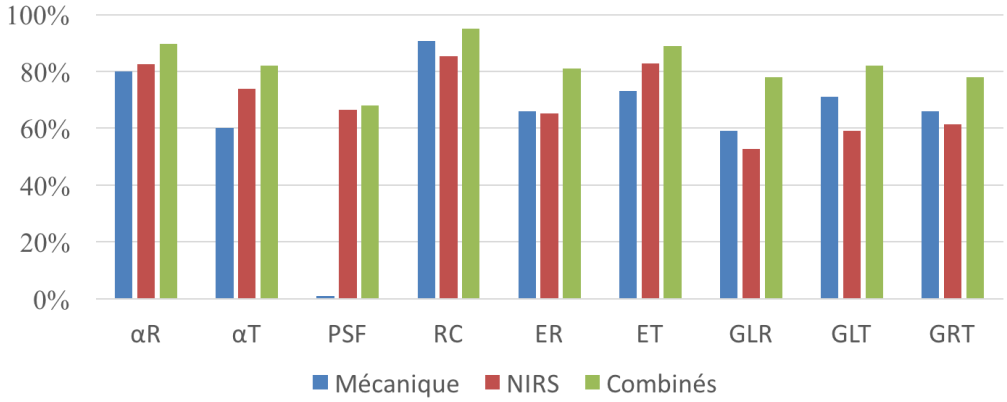


Fig. 3 : Coefficients de détermination R^2 des modèles (légende identique à Fig. 2)

Comme cela était attendu, les modèles construits en combinant les deux méthodes affichent de meilleurs coefficients de détermination pour l'ensemble des propriétés (Fig. 3). On constate dans les modèles combinés que la largeur de cerne n'apporte quasiment aucune amélioration. Il est permis de discuter de l'intérêt de garder ce paramètre assez coûteux à

mesurer.

L'analyse de la dispersion des résidus pour les modèles construits, par des tests d'hypothèses (test de Bartlett et test de Levene) ne révèle pas d'effet « essence » significatif (dans notre échantillonnage). Ceci signifie qu'il n'est pas nécessaire de bâtir des modèles pour chaque espèce de pin et qu'il est possible d'utiliser les modèles construits pour tous pins confondus.

Conclusion et perspectives

La combinaison de mesures physico-mécaniques simples et d'une mesure de spectrométrie proche infra-rouge donne de bons résultats dans la prédiction des propriétés élastiques (ainsi que la contrainte à la rupture en compression) et hygroscopiques des bois de pin « sans défauts ».

Si l'étude et la prédiction des propriétés élastiques linéaires et hygroscopiques apparaissent comme une première étape logique dans la caractérisation des bois « sans défauts », pour répondre aux besoins des concepteurs de composants structurels, il faut envisager de compléter leur caractérisation mécanique.

Remerciements

This work has been carried out thanks to the support of the LabEx NUMEV project Digital and Hardware Solutions and Modeling for the Environement and Life Sciences (n° ANR-10-LABX-20) funded by the «Investissements d'Avenir» French Government program, managed by the French National Research Agency (ANR), along with the support of the École des Mines d'Alès.
The experiments forming the body of this work have been conducted in CIRAD and IES (Institut d'Électronique et des Sytèmes) laboratories as well as the LMGC (Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil).

Références

Alexandre, S., Gault, J., Guerin, A.-J., Lefebvre, E., de Menthiere, C., Rathouis, P., Texier, P.- H., Thibault, H.-L., Toussaint, X., et Attali, C. (2012) Les usages non alimentaires de la biomasse. Technical report.

Bertrand, D. (2005) Étalonnage multidimensionnel : application aux données spectrales. Technical report, Techniques de l'Ingénieur.

Cave, I. D. (1968) The anisotropic elasticity of the plant cell wall. Wood Science and Technology, 2 (4) :268–278.

Guitard, D. et El Amri, F. (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. Annals of Forest Science, 44(3) :335–358.

Sathre, R. et O' Connor, J. (2010) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. Environmental Science and Policy, 13 :104–114.

Poster B07

Beyond « clear wood » : exploring the structure-properties of figured woods and of woods with strong gradients selected in craftsmanship

HU Hsien-Tsung[1,3], CABROLIER Pierre[1,2], ALKADRI Ahmad[1,4], CARLIER Capucine[1], GRIL Joseph[1,3], LANGBOUR Patrick[3], BREMAUD Iris[1]

[1]Equipe BOIS, LMGC, CNRS, UM, Montpellier
[2]In the way from wood science to becoming craftsman
[3]CNRS, Institut Pascal, U. Clermont-Auvergne, Aubières
[4]BIOWOOEB, CIRAD, Montpellier
tudaer@gmail.com

Keywords : Wood Mechanics; Variability; Structure-properties; Figured woods; Gradients; Singularities; Craftsmanship; Perception

Introduction :

This poster presents a beginning Ph.D. research. The subject focuses on an apparent paradox between different approaches to wood: from the viewpoint of engineering sciences (as from industrial uses), "good" wood is orthotropic, well oriented and homogeneous, singularities are considered as "defects". In standing tree, as the living organism, homogeneity can be considered as a singularity. And from the viewpoint of artisanal usage, either heterogeneity or singularities or both can be considered as "defects", on the contrary, as "qualities" according to the considered uses. The subject, therefore, concerns the permeability between the concepts of "defect" and "quality". It aims to fulfil the gaps in knowledge of heterogeneous woods (figured woods, grain deviations, pieces including gradients, etc.). It also concerns usage-function adequacy and should open the way to a better identification of "precious" wood (e.g., figured) and to a better valorisation of wood types that are usually underestimated.

The scientific question is posed, different from most current research work on "clear wood", for seldom addressed in wood mechanics: How to explain the mechanical behaviour of wood with strong gradients in its properties or with grain deviations or both? Knowing that such types of wood are sought after and deliberately selected in several fields of woodcrafts. The “figured wood” is a particular concern here, because of the trade-offs between mechanical and aesthetical criteria for the choices. The main orientation of the cells does not follow the axis of the trunk, but instead the cells’ direction present more or less periodic reorientations, according to different schemes and material axes (Beal and Davis, 1977).

Previous research at LMGC

Initial work on the structure-property relations of certain cases of figured wood has been initiated in the LMGC wood team over the past dozen years: consideration of a case of interlocked grain (Brémaud *et al.*, 2010), then, for the diversity and possible biomechanical causes of this figure (Cabrolier, 2006; Cabrolier *et al.*, 2009; collaboration EcoFoG Guyana). Another work concerned the analysis of reduced anisotropy in the burr of “Thuya” (El Mouridi *et al.*, 2011). More recently, this theme has been integrated into the "ethno-bio-mechanical" approach developed at LMGC (Brémaud, 2016), in which the study of mechanical behaviour is considered as an interface between the botanical origins of the variability/diversity of the material, and the cultural implications of the human-wood relationship in crafts (Cabrolier and Brémaud, 2014). In this new perspective, two studies

were discussed, taking into account compromises between mechanical and aesthetic criteria: deliberate selection of reaction wood sectors (Cabrolier *et al.*, 2015), and wavy figure in lutherie maple (Alkadri *et al.*, 2018). The topic of gradients along the radius was also addressed for spruce resonance wood (Carlier, 2016).

Work plan of the beginning Ph.D.

The scientific project is structured according to the 5 tasks below, with the core of the Ph.D. subject corresponding to tasks b), c), d) (while tasks a) and e) will be included in larger frames of research):

a) Surveys with craftsmen and possibly with foresters/sawyers to identify the uses of wood with high gradients of properties and the selection trade-offs between mechanical, aesthetic and resource constraints.

b) Establishment of a typology of the types of wood concerned (figured wood, grain deviations, pieces naturally curved and/or including different sectors and/or types of wood...) according to different usages.

c) Exploration of botanical diversity (interspecific) and variability (intraspecific) to contribute to the question of the determinism of certain singularities and their mechanical characteristics.

d) Reduction of the problem according to a typology of the observation scales relevant for the multi-scale analysis of the relation between structure (sub-parietal scale, cell orientation, anatomy/tissue organisation, atypical gradients on the radius and/or section of a tree, etc.) and mechanical properties (including dynamic/vibrational and anisotropy). Then, experimental characterization (and modelling) of the structural mechanical repercussions in conditions of use of these woods with high gradients of properties, following a reduced selection of modalities representative of the established typology.

e) Study of the visio-tactile sensory perception by craftsmen, especially for "figured" woods (wavy, flamed, birdseye, interlocked grain, etc.)

Acknowledgements

The beginning Ph.D. research of 1st author Hsien-Tsung HU is co-funded by University of Montpellier and by Région Occitanie. Previous works on the general topic were supported by CNRS (Ph.D. Grant to C. Carlier) and by Région Languedoc-Roussillon ("Chercheur(se)s d'Avenir" award to I. Brémaud with funding for Post-Doctoral position to P. Cabrolier and for M2 Internship to A. Alkadri). We gratefully acknowledge all crafts(wo)men who collaborated in past steps and those who will in next steps.

Références

Alkadri, A., C. Carlier, I. Wahyudi, J. Gril, P. Langbour and I. Brémaud (2018). "Relationships between anatomical and vibrational properties of wavy sycamore maple." IAWA Journal 39(1): 63-86.

Beals, H. O. and T. C. Davis (1977). Figure in Wood-An Illustrated Review, Alabama Agricultural experiment station. Bulletin 486, 79p.

Brémaud, I. (2016). Vers une vision « ethno-bio-mécanique » des bois - La rhéologie du matériau-bois à l'interface entre diversité botanique et usages en lutheries et artisanats. HDR Univ. Montpellier. 149pp

Brémaud, I., P. Cabrolier, J. Gril, B. Clair, J. Gérard, K. Minato and B. Thibaut (2010). Identification of anisotropic vibrational properties of Padauk wood with interlocked grain. Wood Science and Technology 44(3) : 355-367

Cabrolier, P., Description et comportement mécanique des bois contrefilés, 2006, Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques).

Cabrolier, P., Beauchêne, J., Thibaut, B. Is interlocked grain an adaptive trait for tropical tree species in rainforest? in Plant Biomechanics. 2009. FrenchGuyana.

Cabrolier P. and I. Brémaud (2014). Edition of the Book of Abstract of 1st International Symposium WoodSciCraft: Wood Science and Craftsmanship: Cross-Perspective between Europe and Japan, 8-12 September 2014, Montpellier, France. Printed for Equipe BOIS, LMGC (UMR5508, CNRS, UM2) by AVL Diffusion, Montpellier. 88p.

Cabrolier, P., Salenson, B. and Brémaud, I. (2016). Physical and mechanical properties of Boxwood (*Buxus sempervirens* L.) – From the empirical knowledge to measured properties. 2cd International Symposium WoodSciCraft "Technology and Beauty in Wood Utilization", 20-24/09/2016, Kyoto, Japan, 5pp.

Carlier, C. (2016). Une approche décloisonnée des "bois de résonance" d'épicéa et d'érable: critères de sélection et variabilité du matériau en lutherie du quatuor sous les points de vue artisanaux, mécaniques, acoustiques et sensoriels (An approach of spruce and maple "Resonance wood": selection criteria and variability of material in Violin making from the points of view of craftsmanship, mechanics, acoustics and sensory perception). Ph.D. Univ. Montpellier. 169pp

El Mouridi, M., Laurent, T., Brancheriau, L., Arnould, O., Famiri, A., Hakam, A., Gril, J. (2011) Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples. Maderas. Ciencia y tecnología. 13:285-296.

Harris, J. M. (1989). Spiral grain and wave phenomena in wood formation. Berlin Heidelberg New Tork, Springer-Verlag. 214pp

Hernandez, R. E. (2007). "Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods." Wood Science and Technology 41: 249-265.

Richter, C. (2015). Wood Characteristics: Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation. 222pp

Poster B08

Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent

ALKADRI Ahmad[1,2], JULLIEN Delphine[2], ARNOULD Olivier[2], DYAKONOVA Nina[3], COQUILLAT Dominique[3], GRIL Joseph[4]

[1]Henri Selmer Paris, 25 rue Maurice Berteaux, 78711 Mantes-la-Ville, France
[2]Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier, CNRS (UMR 5508), Montpellier, France
[3]Laboratoire Charles Coulomb (L2C), Université de Montpellier, CNRS (UMR 5521), Montpellier, France
[4]Institut Pascal, Université de Clermont Auvergne, CNRS (UMR 6602), Aubière, France
ahmad.alkadri@umontpellier.fr

Mots clefs : bois, diffusion, teneur en eau, TéraHertz

Contexte et objectif

Une étude sur la caractérisation de bois tropicaux (*Dalbergia melanoxylon* ou ébène du Mozambique) pour la facture d'instruments à vent est en cours dans le cadre d'une collaboration entre Henri SELMER Paris et le LMGC. Les objectifs de ces travaux sont de mieux caractériser la ressource utilisée par l'entreprise Henri Selmer Paris. Les recherches portent actuellement sur la diffusion de l'eau dans des échantillons de bois de différentes espèces et présentant des formes variées (cylindriques, parallélépipédiques, autres…), la modélisation de la teneur en eau à l'équilibre (EMC) sous diverses conditions atmosphériques, la mesure des coefficients de retrait et gonflement du bois au cours de changement de teneur en eau, et la validation d'un modèle de diffusion anisotrope en utilisant l'imagerie TéraHertz (THz).

Méthodes

Les expérimentations sur la diffusion reposent sur deux formes géométriques d'échantillons : parallélépipédique (Alkadri *et al.* 2017) et cylindrique creux (Fig. 1). Les échantillons sont stabilisés sous plusieurs conditions atmosphériques (température T en °C et humidité relative HR en %) pour mesurer les coefficients de diffusion et les teneurs en eau à l'équilibre avec la méthode gravimétrique classique.

La diffusion sur les échantillons parallélépipédiques et cylindriques a été modélisée. Dans Alkadri *et al.* (2017), nous avons décrit la modélisation de la diffusion dans des échantillons parallélépipédiques. Pour la diffusion dans des échantillons cylindriques, nous avons supposé que : (a) le matériau, bois de *Dalbergia melanoxylon*, est quasi-isotrope transverse (coefficient de diffusion radiale D_R ~ tangentielle D_T). Ainsi, selon la loi de Fick, la quantité d'eau diffusée (C) dans le bois dans un plan du cylindre peut être écrite comme (Carslaw & Jaeger 1959, Crank 1975) :

$$D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r}\right)=\frac{\partial C}{\partial t}, \qquad \text{(eq. 1)}$$

où r est la position radiale dans le cylindre, D est le coefficient de diffusion, et t le temps. Si le cylindre est creux, avec a son rayon intérieur et b son rayon extérieur, et si on isole les faces transverses, la diffusion va se passer principalement dans la direction radiale ou quasi-unidimensionnelle comme le cas de cylindre infini (Crank 1975).

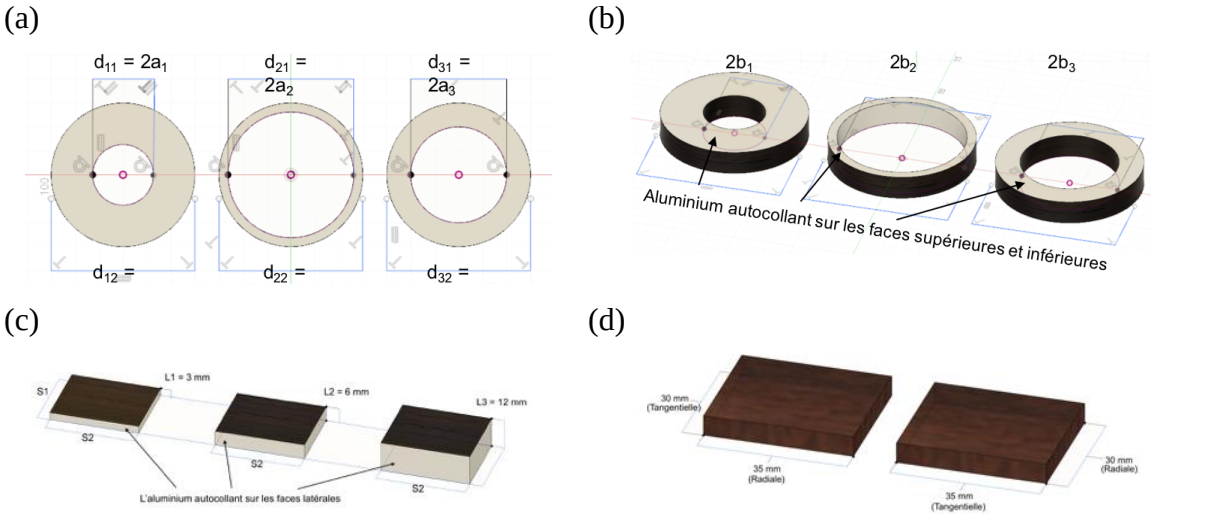


Fig. 1 : (a & b) Plan d'échantillonnage cylindrique creux avec différents ratios rayon extérieur/intérieur (*b/a*) ; (c) plan d'échantillonnage parallélépipédique, fait sur les trois orientations du bois (tangentielle, radiale, et longitudinale) ; (d) échantillons pour mesurer les teneurs en eau à l'équilibre du bois.

Avec cette géométrie, si la teneur en eau C_0 sur les bords extérieur et intérieur est constante, soit les conditions aux limites $C(r = a, t) = C(r = b, t) = C_0$, on obtient alors la solution suivant Carslaw et Jaeger (1959) :

$$C = C_0 \left[1 - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(a\alpha_n)U_c(r\alpha_n)}{J_0(a\alpha_n)+J_0(b\alpha_n)} e^{-\alpha_n^2 Dt}\right], \qquad \text{(eq. 2)}$$

$$U_c(r\alpha_n) = J_0(r\alpha_n)Y_0(b\alpha_n) - J_0(b\alpha_n)Y_0(r\alpha_n) \qquad \text{(eq. 3)}$$

avec J_0 la fonction de Bessel de première espèce, α_n les racines de l'expression (3) pour $r = a$ et Y_0 la fonction de Bessel de deuxième espèce. Cette solution est aussi connue comme celle de la diffusion radiale dans le plan transverse d'un cylindre creux.

Par la suite, nous allons comparer les données expérimentales obtenues avec le modèle analytique ci-dessus et un modèle numérique en utilisant MATLAB® (MathWorks 2015).

Pour valider le modèle de diffusion, et pour observer directement la diffusion de l'eau, nous avons utilisé l'imagerie THz (Bensalem *et al.* 2018). Elle a été réalisée en mode transmission à une fréquence de 0,29 THz et polarisation du champ électrique vertical, i.e., perpendiculaire aux fibres de l'échantillon, et est en cours de mise au point et de calibration sur des échantillons de différente densité (e.g., balsa ou hêtre).

La teneur en eau en conditions atmosphériques variées a été mesurée et modélisée. Les mesures ont été faites à plusieurs températures (T = 20°C, 25°C, 40°C et 60°C) et sous différentes HR pour chaque niveau de température (HR = 25%, 45%, 65% et 85%). Nous avons également mesuré les variations dimensionnelles correspondantes des échantillons de bois pendant l'adsorption. Les valeurs sont modélisées comme suit :

$$\Delta Y = Y - Y_0 = \beta \times \mathrm{MC} \qquad \text{(eq. 4)}$$

Avec Y la dimension du bois dans une direction pour une teneur en eau MC et β le coefficient de retrait/gonflement. Un modèle similaire doit être développé pour le cas de la désorption, mais cela nécessitera que les échantillons de bois soient dans un état complètement saturé afin de pouvoir de mesurer le PSF (point de saturation des fibres) précisément.

Résultats

Nous avons utilisé les modèles numériques de diffusion dans le plan transverse d'un cylindre infini creux. Pour la même valeur de $D \times t$, la distribution de concentration C/C_0 est affectée fortement par les ratios b/a (Fig. 2). Cela correspond bien au modèle analytique.

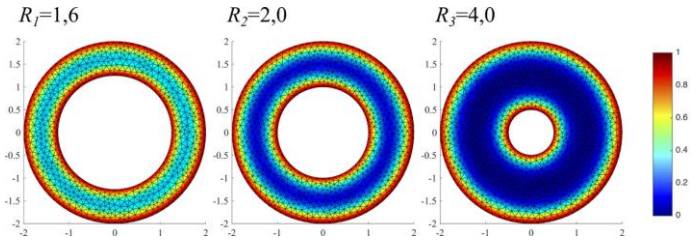


Fig. 2 : Modèle de distribution de concentration (C/C_0) pour la diffusion dans trois cylindres creux pour la même valeur Dt = 0,4. R_1, R_2, et R_3 correspondent aux valeurs de b/a.

Ensuite, avec les données expérimentales obtenues, nous avons comparé les valeurs de quantité totale d'eau diffusée (correspondant à la méthode usuelle gravimétrique de mesure du coefficient de diffusion moyen) avec celles de modèle analytique et numérique (Fig. 3). On peut voir que les valeurs expérimentales et celles des modèles correspondent bien.

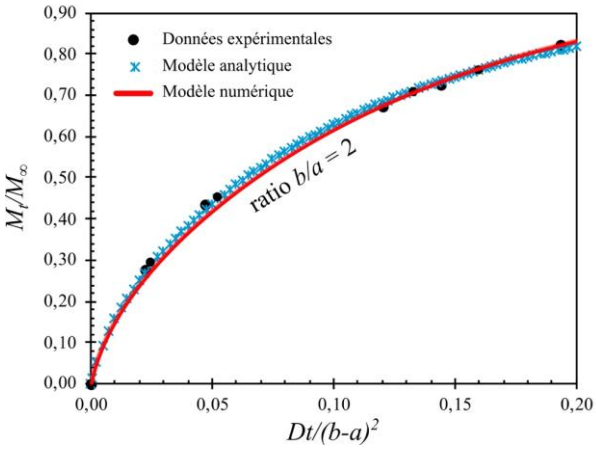


Fig. 3 : Ratio de quantité total d'eau diffusé (M_t/M_∞) dans le plan du cylindre creux : comparaison entre les données expérimentales et les modèles (analytique et numérique)

Concernant le gonflement du bois, suite aux mesures faites dans les directions R et T, et les mesures surfaciques, nous avons déterminé les paramètres de gonflement et les pourcentages de changements de dimension pour les deux directions R et T (Fig. 4). On peut voir que la valeur de β dans la direction R est inférieure à celle dans la direction T. Malheureusement, étant donné que nous n'avons pas encore pu saturer les bois complètement ni avoir les données de masse du bois à l'état vert, nous n'avons pas encore les données réelles de PSF et donc les valeurs de retrait ne sont pas encore déterminées. Les travaux à venir concerneront l'imbibition des échantillons avec de l'eau sans dissoudre les extractibles dans le bois.

Enfin, concernant les mesures THz, la détection de l'eau aux fréquences THz est liée à sa forte absorption dans ce domaine de fréquence. Ainsi l'imagerie d'absorption en THz (2D voire 3D) permet d'obtenir la distribution de l'eau au cours de la diffusion (Fig. 5). Les travaux futurs sur cette partie concerneront : (a) la calibration pour obtenir les valeurs précises d'atténuation pour chaque valeur de teneur en eau, (b) les essais préliminaires sur d'autres essences de bois ayant des structures homogènes et des densités plus faibles, et (c) les essais sur le bois pour la facture d'instruments à vent (*Dalbergia melanoxylon*).

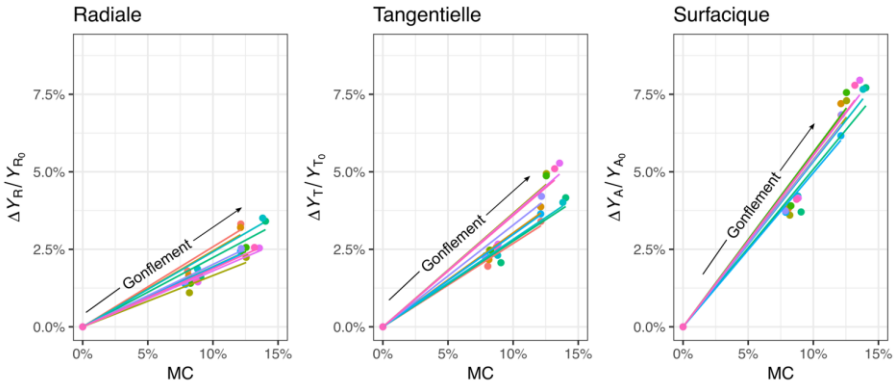


Fig. 4 : Gonflements des échantillons en fonction de *MC* pendant l'adsorption. Les points représentent les données expérimentales et les lignes les modèles ; chaque couleur répresente différents échantillons qui proviennent d'un même barreau de bois.

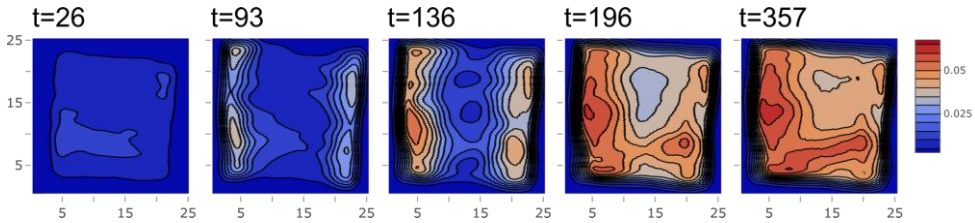


Fig. 5 : Images montrant l'évolution de la transmission du faisceau THz (V) dans un échantillon de balsa (22 mm × 22 mm × 4 mm, fibres perpendiculaires au champ électrique de la radiation THz) avec tous les cotés isolés sauf les faces latérales par où l'eau peut diffuser au cours du temps *t* (en minutes).

Conclusions et perspectives

La caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois est en cours d'étude à l'aide d'échantillons parallélépipédiques et cylindriques creux et diverses techniques (suivi global par pesée, imagerie THz). Les travaux à venir vont se focaliser sur la caractérisation de la diffusion dans des géométries plus complexes. Des expérimentations permettant de déterminer précisément le PSF doivent être faites afin de déterminer la valeur des coefficients de retrait du bois. Nos recherches portent actuellement sur la modélisation de la relation entre *HR* et *MC* en comparant les résultats obtenus avec le modèle usuel de Hailwood-Horrobin (1946).

Références

Alkadri A., Jullien D., Arnould O., Langbour P., Gril J. (2017) Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent. In: *6èmes journées du GDR 3544 "Sciences du bois"* , Nov 21-23, Nantes, France.

Bensalem M., Sommier A., Mindeguia J.C., Batsale J.C., Pradere C. (2018) Terahertz measurement of the water content distribution in wood materials. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39 (2):195–209.

Carslaw & Jaeger. (1959) *Conduction of Heat in Solids*. London: Oxford University Press.

Crank J. (1975) *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed. New York: Oxford University Press.

Hailwood A.J., Horrobin S. (1946) Absorption of water by polymers: Analysis in terms of simple model. *Trans. Faraday Soc.* 42B: 82–102.

MathWorks. (2015) *MATLAB and PDE Toolbox Release 2015b*. Natick: The MathWorks, Inc., Massachusetts, United States.

Poster B09

Présentation d'un projet PEPS CNRS : GREENWOOD

BARDET Sandrine [1], CARE Sabine [2],
MONTERO Cédric [1] et COURTIER-MURIAS Denis [2]

[1] LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France
[2] Laboratoire Navier, UMR 8205, CNRS, IFSTTAR, ENPC, Champs sur Marne, France
sandrine.bardet@umontpellier.fr

Mots clefs : bois vert ; éco-construction ; économie d'énergie ; comportement hygro-mécanique ; fluage ; assemblage ; transfert ; couplages multiphysiques

Présentation du projet soumis

Le contexte du changement climatique et la nécessité de s'orienter vers une société plus sobre énergétiquement donnent un poids considérable au développement de l'industrie du bois, par le caractère écologique et renouvelable de cette ressource naturelle. Bien que déjà utilisé dans le secteur de la 1ère transformation (déroulage, sciage), le bois vert ne l'est pratiquement pas dans les secteurs de la construction ou de l'aménagement urbain, où il est séché avant sa mise en œuvre, ce qui engendre des dépenses énergétiques importantes (par exemple, 400 kWh/m3 de bois de résineux), alors que les autres étapes de transformation du bois (récolte, transport, usinage) sont peu consommatrices en énergie (environ 30% de l'énergie totale dépensée).

Le bois est sensible aux variations climatiques (température, humidité relative) et il se déforme en conditions de service (variations dimensionnelles et déformation de fluage), ce qui a des conséquences sur la qualité des structures. Alors que la normalisation (Eurocode 5) recommande de travailler avec des bois secs, le bois vert a pourtant été utilisé longtemps dans la construction, pour les bâtiments ou les ouvrages de franchissement. Ainsi, des études en archéodendrométrie montrent que jusqu'au Moyen Âge, les arbres (en majorité des chênes) étaient coupés pendant la période de repos végétatif pour être mis en œuvre dans les mois suivants sans que le bois soit dans un état dit « sec » (Lavier 2005). Le patrimoine bâti montre que cette technologie a permis de concevoir des structures d'excellente longévité encore pérennes aujourd'hui.

Les études sur le bois vert (c'est à dire fraîchement coupé) font apparaître plusieurs spécificités : (i) le comportement hydrique lors la 1ère désorption est différent des cycles suivants (Kollman et Côté 1968, Pernes 2013) ; (ii) les déformations de séchage du bois vert ont été étudiées souvent en relation avec les fissures des grumes ou de rondelles lors du séchage (Jullien 95, Moutou Pitti 2013). Mais de nombreuses questions sont toujours en suspens. Il s'agit par exemple de comprendre pourquoi le séchage du bois vert est différent de celui du bois qui a déjà subi une première désorption et ré-humidification. Par ailleurs, de nombreuses études des déformations à long terme sous un chargement mécanique (fluage), ainsi que du comportement mécanosorptif (couplage entre déformation et variation d'humidité) ont souvent comme état initial l'état sec. L'enjeu est de mieux appréhender le comportement différé du bois vert.

Cette étude exploratoire porte sur l'étude du comportement hydrique et mécanique du bois vert dans le but de promouvoir son utilisation dans la construction en fonction des chargements mécaniques, des procédés de construction actuels et de la réglementation. Ce projet est financé par le CNRS dans le cadre de l'appel à projet « Projets Exploratoires Premier Soutien » sur le thème de l'Ingénierie Verte (PEPS INSIS 2018) et

s'intitule « GREENWOOD : Innovation dans la construction en bois : opportunité de l'utilisation du bois vert ? ». Il est mené conjointement au LMGC, Montpellier et au laboratoire Navier, Champs-sur-Marne.

Trois axes d'étude ont été proposés dans le cadre de cet appel à projet pour répondre aux questions en suspens : (i) comportement hydrique du bois vert, (ii) comportement différé du bois vert et (iii) assemblages en bois vert. Les résultats préliminaires des deux premiers axes sont présentés ici. Le troisième axe, plus prospectif, ne fait pas l'objet de ce résumé.

Matériaux et méthodes

Dans cette étude, plusieurs essences ont été choisies : des bois de résineux utilisés dans la construction (Epicéa et Douglas utilisés très fréquemment en construction ainsi que le Sapin Pectiné car c'est une essence que l'on se sait pas actuellement sécher et qui représente une ressource non négligeable en France pour les années à venir) ou des bois de feuillus car c'est une ressource pour laquelle l'offre forestière est prédominante par rapport aux bois de résineux (2/3 de la ressource forestière métropolitaine est constituée de feuillus) et par ailleurs utilisée fréquemment dans les siècles passés (comme le Chêne ou le Peuplier).

Lorsque la ressource le permettait, les échantillons ont été usinés à partir de billons prélevés sur des arbres qui ont fait préalablement l'objet de mesures de l'état de contraintes de croissance en périphérie (lieux de prélèvement : Montpellier, Biron). Ainsi le suivi des échantillons est assuré et les zones de type de bois (bois opposé/ bois de réaction) sont connues. Dans le cas du Peuplier, en plus des zones de bois tendu et opposé, 2 zones sont identifiées par leur couleur : zone claire vers l'écorce et zone marron correspondant au faux cœur de peuplier. Pour le Douglas, l'aubier et le duramen sont clairement identifiés.

Trois exemples de prélèvement réalisés par le LMGC sont indiqués dans les Fig. 1, Fig. 2 et Fig.3 (date d'abattage 07/06/2018, 34080 Montpellier et 07/09/2018, 64300 Biron). Les échantillons prélevés dans les billons sont conservés dans un linge humide et placés dans une chambre froide pour éviter toute dégradation biologique.

Le comportement hydrique du bois vert est étudié plus particulièrement au laboratoire Navier : cinétique de séchage en lien avec les déformations hydriques, états de l'eau par RMN du proton (relaxométrie RMN, T2). Les essais réalisés au LMGC concernent plus spécifiquement les propriétés mécaniques du bois vert : essais Bing, Vybris et de fluage.

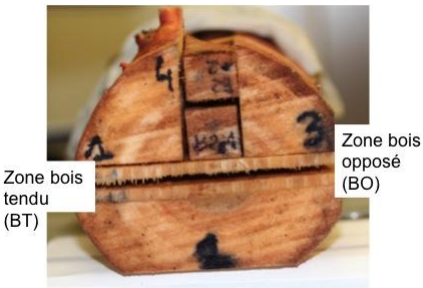


Fig. 1 : Peuplier, Montpellier, Billon 1 – Indication des zones de bois tendu et de bois opposé, des planchettes usinées entre ces 2 zones pour les essais mécaniques au LMGC.

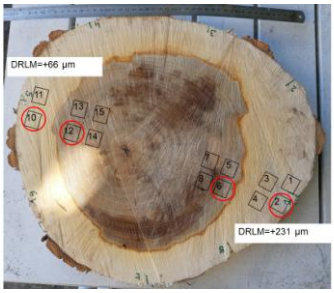


Fig. 2 : Peuplier, Biron, Billon 1 – Indication des mesures DRLM et des prélèvements des barreaux (en rouge ceux étudiés par le laboratoire Navier)

Fig. 3 : Douglas, Biron, Billon 1 - Indication et des prélèvements des barreaux (en rouge ceux étudiés par le laboratoire Navier)

Résultats préliminaires

Nous présentons ici des exemples de résultats préliminaires pour l'analyse du comportement hydrique du bois vert (Fig. 4 et Fig. 5) et du comportement mécanique du bois vert (Fig. 6 et Fig. 7).

Sur les Fig. 4 et Fig. 5 sont présentées, pour un peuplier (origine : Montpellier), d'une part les variations de volume en fonction de la variation de masse pour des échantillons prélevés dans la zone marron ou dans la zone claire et placés dans une ambiance HR=23% ou HR=65% et d'autre part les évolutions de la teneur en eau libre dans les vaisseaux et les fibres et en eau liée obtenues par RMN en fonction du temps. Ces résultats montrent que lors du séchage, les vaisseaux puis les fibres de vident de l'eau libre, alors que la teneur en eau liée reste constante (Fig. 5). Lorsqu'il n'y a plus d'eau libre dans les vaisseaux et les fibres, la teneur en eau liée diminue (non présenté ici). Ce processus est cohérent avec les résultats de la Fig. 4 qui montrent deux stades pendant le séchage, un premier stade sans déformation, puis un second stade avec des retraits. Ces résultats montrent un comportement différent pour le bois issu de la zone marron et celui issu de la zone claire.

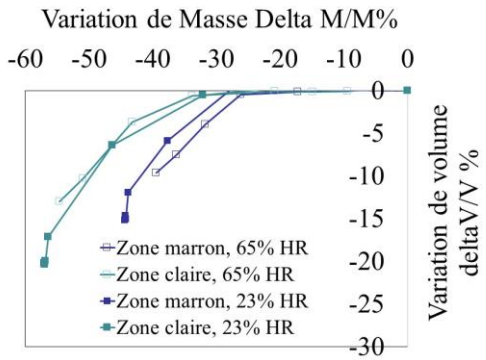


Fig. 4 : Variation de volume en fonction de la variation de masse pour 4 échantillons. Prélèvement dans les zones claire et marron. HR 23% ou 65%.

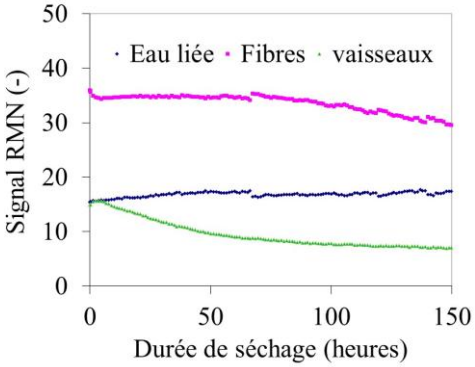


Fig. 5 : Evolutions des teneurs en eau (Signal RMN) dans les vaisseaux, fibres et dans les parois en fonction du temps. environ 50% HR et prélèvement dans la zone claire.

Les valeurs de densité d, de module longitudinal spécifique E_L/d (Fig. 6) et de coefficient d'amortissement tan δ (Fig. 7) ont été mesurées sur des échantillons de bois tendu (BT) et de bois opposé (BO) soit maintenus à l'état vert dans un linge humide soit au cours du séchage à l'air libre. Les premiers résultats font apparaître une différence de propriétés mécaniques entre les échantillons maintenus à l'état vert et ceux séchés à l'air libre. Par exemple pour le peuplier, d évolue de 1,07 (Bois vert) à 0,5 (sec à l'air), E_L/d de 5,4 à 13,2 GPa et tan δ de $2{,}45.10^{-2}$ à $1{,}29\ 10^{-2}$. Les dimensions des échantillons sont 150 mm (L) x 12 mm (T) x 3 mm (R). La méthode de conservation des échantillons à l'état vert est satisfaisante, les propriétés mécaniques n'évoluent pas au cours du temps. La cinétique observée permet de mettre en évidence l'évolution des propriétés mécaniques au cours du séchage.

Les essais de fluage ont été réalisés sur des échantillons de mêmes dimensions, en flexion 3 points. Deux jauges sont collées sur la face supérieure et sur la face inférieure. Un échantillon sèche à l'air libre, l'autre est enrobé de parafilm pour assurer qu'il reste à l'état vert. On observe une variation brutale des déformations en cours de séchage, une hypothèse est que le fluage augmente brutalement lorsque la teneur en eau de l'échantillon passe en dessous du PSF. Cette hypothèse reste à vérifier.

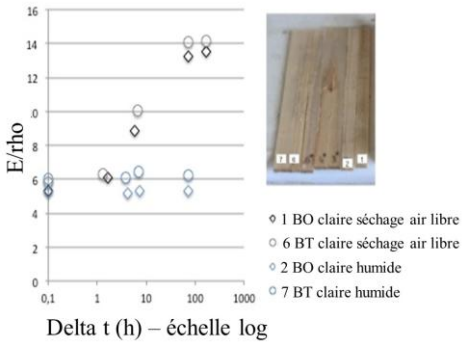


Fig. 6 : Evolution des valeurs de modules spécifiques pour les échantillons de bois tendu ou opposé, humide ou au cours du séchage.

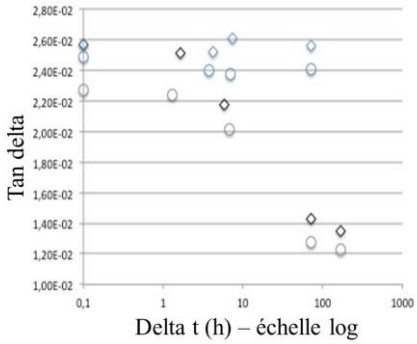


Fig. 7 : Evolution des valeurs de coefficient d'amortissement pour les échantillons de bois tendu ou opposé, humide ou au cours du séchage.

Conclusions et perspectives

L'étude menée avait dans un premier temps pour objectif de mettre au point des protocoles de mesure pour l'étude du comportement hydrique et mécanique du bois vert. Un protocole commun entre les 2 laboratoires partenaires a été discuté pour l'échantillonnage, le stockage des échantillons et le suivi des conditions de température et d'humidité.

Les résultats obtenus, pour les propriétés hydriques et mécaniques concernent, à ce jour plus spécifiquement l'état vert. Les mesures réalisées doivent se poursuivre en effectuant des ré-humidifications, puis séchage pour préciser le comportement de la première désorption par rapport aux autres cycles.

Par ailleurs, des analyses structurelles ont aussi été obtenues par tomographie aux rayons X au synchrotron soleil (proposal 20180522, « Water transfers in wood at the cell scale », Laboratoire Navier) sur du peuplier, douglas et sapin pectiné (non présentées ici). Ces analyses devraient permettre de préciser l'état hydrique dans les échantillons en fonction de leur prélèvement (aubier/duramen, bois normal/bois de tension ou compression).

Enfin, ce projet doit se prolonger avec des analyses du comportement d'assemblages avec du bois vert. Des collaborations doivent être mises en place avec notamment avec des historiens.

Remerciements

Le CNRS (INSIS) est remercié pour son soutien financier qui a permis d'initier cette étude et la collaboration entre le LMGC et le laboratoire Navier ainsi que le CIRAD Montpellier pour la découpe des barreaux dans les billons.

Références

Jullien D., Gril J. (1996) Mesure des déformations bloquées dans un disque de bois vert. Méthode de la fermeture. Annales des Sciences Forestières, 53(5) : 955-966.

Kollman F., Côté W. (1968) Principles of wood science and technology: solid wood.

Lavier, C. (2005) Wood in the history of Medieval book techniques: aims and know-how. First restorations. Care and Conservation of Manuscripts, 8 19-33.

Moutou Pitti R., et al. (2013) Strain analysis in dried green wood: Experimentation and modelling approaches. Engineering Fracture Mechanics, 105 182-199.

Pernes M., Clair B. et Beaugrand J. (2013) Acquisition d'isothermes de sorption d'eau: méthodologie, représentation et application au bois, Cahier des Techniques de l'INRA (80)3.

Poster B10

Travaux exploratoires multidisciplinaires sur l'influence du bois des ruches sur les abeilles : anthropologie, hygrothermie, écologie chimique et intelligence artificielle pour le suivi du comptage de parasites

DUPLEIX Anna[1], MUI Shu Wah[1], JULLIEN Delphine[1], MOITY-MAÏZI Pascale[2,3], MILLIET-TREBOUX Pauline[3], SCHATZ Bertrand[4], REUTENAUER Victor[5], PFISTER François[6], CARLIER Capucine[1]

[1]LMGC (Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Montpellier), Equipe BOIS
[2]IRD GRED (Gouvernance, Risque, Environnement, Développement)
[3]Montpellier SupAgro
[4]CEFE (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive), Equipe Interactions Biotiques
[5]Fotonower
[6]Connecthive
anna.dupleix@umontpellier.fr

Mots clefs : bois des ruches ; anthropologie, hygrothermie, écologie chimique, varroa, intelligence artificielle

Introduction

Le bois de construction des ruches est un sujet peu abordé dans le monde apicole en général. Ce projet a pour but d'étudier dans quelles mesures le matériau bois constitue potentiellement une source importante d'amélioration de l'état sanitaire et donc de la survie des colonies aujourd'hui en déclin. Ce projet interdisciplinaire adopte les outils des sciences du bois et des sciences du vivant pour étudier les interactions entre les abeilles et les caractéristiques physiques et chimiques du bois des ruches ; les sciences sociales sont conviées pour étudier les relations entre usagers des ruches, types de matériau et bien-être des abeilles du point de vue de l'humain.

Contexte

Depuis 2000, le monde apicole est en crise du fait du déclin des colonies d'abeilles : de fortes pertes de colonies d'abeilles (CCD : Colony Collapse Disorder) ont été reportées dans de nombreux pays [Neumann and Carreck 2010]; elles sont dues à une combinaison de facteurs affectant la santé des colonies (Varroa destructor, pathogènes, sélection génétique, changement des pratiques apicoles [Le Conte et al. 2010, Le Conte and Navajas 2008]). La perte annuelle moyenne actuellement de 30% du cheptel génère la réduction du stock d'abeilles domestiques (*Apis mellifera*) alors que la dépendance aux pollinisateurs des productions agricoles mondiales ne cesse de croitre. La recherche de solutions est aujourd'hui cruciale pour faire évoluer cette filière vers une apiculture et une agriculture durables.

Physiologiquement, la colonie d'abeilles domestiques est un super-organisme (organisme constitué de multiples organismes, les abeilles, Fig. 1) qui vit abrité dans un habitat qui le protège de son environnement. Cet habitat peut être naturel dans le cas de colonies non domestiquées - depuis des millions d'années, les colonies se sont développées dans des troncs d'arbre creux [Seeley and Morse 1976] - ou bien artificiel car fabriqué par l'homme dans le cas de colonies domestiquées. Dans les deux cas, le bois constitue le matériau naturel dominant de construction de cet habitat (la paille et la terre cuite également mais globalement moins répandues à l'échelle mondiale): troncs creux, ruches tronc ou bois de menuiserie.

Pourtant, le matériau de la ruche n'entre quasiment pas dans le champ de la recherche apidologique, aujourd'hui fortement sollicitée par les problèmes environnementaux et sociétaux liés au déclin actuel du cheptel [Matthews 2011, Harries-Jones 2009], et dont l'objet d'étude est le fonctionnement biologique (au sens large) de l'abeille, de la colonie et de ses interactions avec le milieu.

Le but de cette recherche est de combler l'absence de connaissances sur l'objet « bois des ruches ». Notre hypothèse est que le bois forme une enveloppe structurelle indissociable du super-organisme (comme un exosquelette) et qu'il favorise, au-delà de son rôle de protection physico-mécanique vis-à-vis de l'extérieur, des interactions physiques, chimiques et biologiques au service du confort interne des abeilles. Si de telles interactions fondamentales étaient démontrées, la notion de « super-organisme » évoluerait vers celle d'un « super-organisme composé d'une enveloppe structurelle avec laquelle il interagit pour survivre » (Fig. 1). Cette recherche vise donc à déterminer dans quelle mesure la ruche peut être utilisée comme un outil d'ingénierie écologique pour protéger les abeilles des contraintes extérieures et générer un environnement intérieur favorable à l'état sanitaire et à l'activité de la colonie.

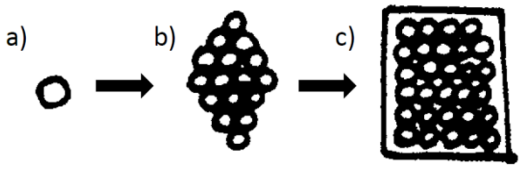


Fig. 1. Evolution de la conception de la colonie d'abeilles : (a) de l'individu abeille au (b) super-organisme, la colonie d'abeilles vers (c) super-organisme dans son enveloppe structurelle, la ruche

L'approche adoptée consiste à examiner l'existence d'interactions entre le super-organisme et son enveloppe structurelle en s'appuyant, d'une part, sur des mesures hygrothermiques et écologiques qui visent à détecter l'influence du matériau bois sur les caractéristiques physiologiques du super-organisme et d'autre part, sur des entretiens anthropologiques qui visent à mettre à jour des connaissances et pratiques spécifiques de maîtrise de ces interactions au sein de la relation de domestication homme-animal (ici, entre apiculteur et abeilles).

Anthropologie : enquête sur les connaissances et représentations des apiculteurs et vendeurs de ruches sur matériau bois des ruches

Une enquête anthropologique exploratoire a été menée dans le sud de la France auprès d'apiculteurs et vendeurs de ruches pour vérifier notre hypothèse : les utilisateurs du bois dont sont faites la plupart des ruches ont bien des connaissances sur le matériau bois qu'ils utilisent et des connaissances des impacts que ce matériau a sur les comportements et la santé des abeilles. Outre une typologie qui intègre les rapports que les utilisateurs de la ruche entretiennent avec le bois dans leurs métiers, les résultats de l'enquête témoignent de vecteurs de bien-être (odeur, humidité, longévité) transmis par certaines essences de bois et jugés déterminants pour les abeilles par les acteurs enquêtés, de connaissances et de degrés de maîtrise des essences qui confirment l'intérêt des usagers pour le bois ainsi que d'un marché gouverné par les facteurs économiques qui influencent le choix des essences, la provenance et donc la qualité des essences utilisées.

Poster B10

Hygrothermie : mesures du climat hygrothermique interne de ruches en différents bois, matériaux et épaisseurs

Des ruches vides construites à l'identique en épicéa, châtaignier, cryptomeria et polystyrène d'épaisseur 15 mm, 21 mm et 30 mm (ouvertes comme le sont des ruches peuplées et fermées) sont instrumentées de capteurs température-humidité pour mesurer le climat hygrothermique interne. Comparés aux mesures météorologiques, ces résultats nous permettront de déterminer la fonction physique que les différents matériaux et épaisseurs testés assurent pour les colonies d'abeilles habitantes. Une seconde phase d'expérimentations consistera à répéter ces mêmes mesures sur des colonies peuplées et de mesurer l'impact sur leur état de santé à l'aide de différents critères (taille de la colonie, fragilité à l'infestation de parasites, production de miel).

Fig. 2 : Ruches instrumentées constituées de différents matériaux

Humidité relative (%) en bleu, Température (°C) en rouge, en fonction du temps sur une période de 15 jours (à gauche, l'extérieur ; à droite, la ruche)

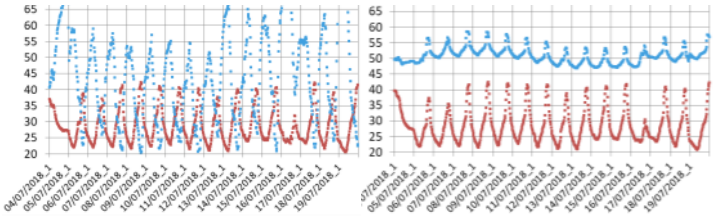


Fig. 3 : Un exemple de résultats hygrothermiques à l'intérieur d'une ruche en châtaignier de 15 mm d'épaisseur comparée à l'extérieur

Ecologie chimique : tests de choix olfactifs sur Varroa destructor, parasite de l'abeille domestique

Jusqu'à présent, la qualité du bois des ruches a été peu explorée pour améliorer les conditions de vie à l'intérieur des ruches d'abeilles domestiques, et notamment pour trouver des solutions de lutte biologique contre l'acarien Varroa destructor. Cependant, d'après des savoirs locaux [Lehébel 2014], certains bois contenant beaucoup de tannins comme le châtaignier étaient fréquemment utilisés dans la construction de ruches, notamment pour lutter contre différents parasites. De plus, des premiers prélèvements d'odeurs de bois de châtaignier révèlent plusieurs composés olfactifs potentiellement répulsifs. Le travail en cours vise à tester si cet acarien, parasite de l'abeille domestique, pourrait être notablement repoussé par l'odeur de châtaignier. Pour cela, des tests en écologie comportementale seront réalisés en observant le déplacement et le choix olfactif de ces acariens placés dans des tubes en T et confrontés à cette odeur de châtaignier.

Intelligence artificielle : comptage automatique du Varroa Destructor

En apiculture, le comptage du varroa est une étape nécessaire pour évaluer la charge parasitaire d'une ruche et effectuer un traitement efficace et adapté à la charge en varroa de la colonie (fréquence de traitement et dosage). Parmi les méthodes recommandées actuellement, le comptage de la chute naturelle des varroas sur des langes graissés placés sous la colonie présente les avantages de ne pas nécessiter l'ouverture de la ruche et d'être non destructif. Cette méthode consiste à compter régulièrement le nombre de varroas tombés naturellement de leurs hôtes sur le plancher de la ruche. Les varroas tombent soit par mortalité, soit par chute due à l'émergence de la jeune abeille ou suite à un comportement d'épouillage. Dans l'objectif de vérifier si l'essence de bois de châtaignier a une influence sur le taux

d'infestation en varroa des colonies, un comptage manuel sur 17 ruches du rucher expérimental (8 ruches en châtaignier, 9 en épicéa constituant la valeur de référence) a été réalisé hebdomadairement pendant 5 mois (de mai à septembre). L'opération est d'autant plus fastidieuse que le niveau d'infestation d'une colonie est importante (Fig. 4 à 6).

Fig. 4 : Lange graissé posé 1 semaine au fond d'une colonie infestée.

Fig. 5 : Comptage manuel

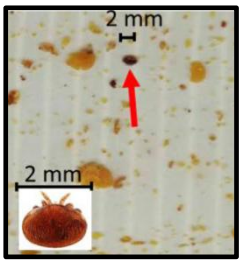


Fig. 6 : image zoomée sur un varroa : les varroas correspondent uniquement aux points ovales

La base de données constituée d'images de langes a permis d'alimenter un algorithme de calcul qui, grâce à la reconnaissance de formes et les réseaux de neurones, estime à partir d'images le nombre de varroas présents par lange. Un transfert technologique est en cours (financement Satt) pour développer une application smartphone qui permette un comptage automatisé, rapide et efficace à l'aide de prise de vue smartphone. Cette application constituerait un outil d'aide à la décision dans la lutte contre cet acarien parasite.

Remerciements

Nous tenons à remercier le Labex Numev pour le financement de ce projet.

Références

Chauvin, R. (1954). Aspects sociaux des grandes fonctions chez l'abeille la théorie du superorganisme. Insectes sociaux, 1(2), 123-129

Harries-Jones, P. (2009) Honeybees, Communicative Order, and the Collapse of Ecosystems. Biosemiotics, 2, 193-204

Le Conte Y., Ellis M., Ritter W. (2010). Varroa mites and honey bee health: can Varroa explain part of the colony losses? Apidologie, 41(3), 353-363

Le Conte Y., Navajas M. (2008). Climate change: impact on honey bee populations and diseases. Revue Scientifique et Technique-Office International des Epizooties, 27(2), 499-510

Lehébel-Péron, A. (2014) L'abeille noire et la ruche-tronc: approche pluridisciplinaire de l'apiculture traditionnelle cévenole: histoire, diversité et enjeux conservatoires, Doctoral dissertation, Université Montpellier

Mathews, F. (2011) Planet Beehive. Australian Humanities Review, 50, 159-178

Neumann P., Carreck N. L. (2010). Peter Neumann & Norman L Carreck (2010) Honey bee colony losses. Journal of Apicultural Research, 49(1), 1-6

Seeley T. D., Morse, R. A. (1976). The nest of the honey bee (Apis mellifera L.). Insectes Sociaux, 23(4), 495-512

Poster B12

Étude expérimentale du transfert de liquide dans le bois de chêne de tonnellerie par imagerie à rayons X

ROUSSEY Claire[1,2], COLIN Julien[1], TEISSIER DU CROS Rémi[2], CASALINHO Joel[1], PERRÉ Patrick[1]

[1]LGPM, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, rue Joliot Curie, Gif-sur-Yvette, France
[2] Chêne & Cie, 33240 Saint André de Cubzac, France
claire.roussey@centralesupelec.fr

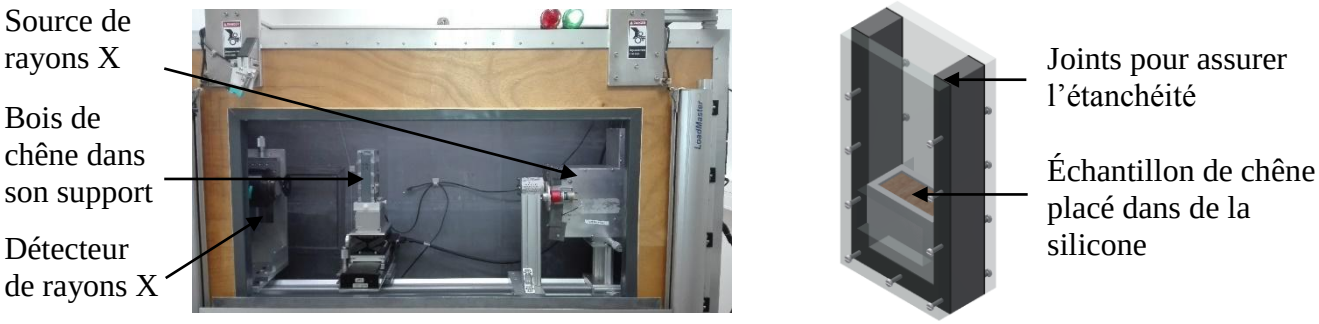
Mots clefs : chêne de tonnellerie, élevage des vins et spiritueux, système d'imagerie à rayons X, corrélation d'images, transferts massiques

Contexte et objectif

La maturation en fût de chêne améliore les qualités organoleptiques des vins et spiritueux. Le bois libère des polyphénols, des ellagitannins et des composés aromatiques qui enrichissent la boisson. La perméabilité du bois permet une lente oxygénation, ce qui favorise l'évolution des composés phénoliques. L'approvisionnement en oxygène est extrêmement délicat à déterminer et à contrôler et peut avoir un effet positif ou négatif sur la boisson selon la quantité apportée. Plusieurs processus physiques se produisent pendant la maturation et affectent l'échange gazeux à travers le fût en chêne (Moutounet et al., 1998). Le bois, matériau poreux et hygroscopique, est imbibé par le vin au cours du temps de maturation (Feuillat et al., 1994). Plusieurs forces motrices sont mises en jeu : le gradient de pression de vapeur entre le côté interne des barriques et le côté externe, la différence de pression totale, les forces capillaires… La diffusion d'oxygène à travers le fût diminue avec l'augmentation du taux d'humidité du bois. Ces phénomènes couplés complexes sont étudiés de manière approfondie grâce à des dispositifs expérimentaux originaux. L'imprégnation du liquide, en particulier, est étudiée par un système d'imagerie à rayons X 2D.

Matériels et méthodes

Le dispositif de mesure non-destructive est développé autour d'une source microfocus de rayons X (Hamamatsu L8601-01) et d'un détecteur digital de rayons X (Fibre Optic Imagestar, Photonic Science) (Fig. 1a). Entre ces deux appareils sont positionnés les échantillons de bois étudiés, prélevés dans les douelles fournis par la tonnellerie Taransaud. Ils ont pour dimension 50x21x21 mm. Chaque échantillon est placé dans un support étanche afin de prendre des images à différents temps d'imprégnation pendant plusieurs mois (Fig. 1b). Les 26 échantillons varient suivant les différentes modalités du tonnelier : l'espèce de chêne, la largeur de cerne et la chauffe sur la face interne du fût. L'imprégnation est étudiée avec de l'eau distillée et une solution à 40% d'éthanol, et se déroule dans le sens tangentiel du bois. Un traitement numérique des images obtenues a été développé pour étudier le profil d'imprégnation du liquide dans l'épaisseur de douelles. Les rayons X traversent le bois dans la direction longitudinale, ce qui permet de repérer certains éléments anatomiques du bois, notamment les vaisseaux. Ainsi, à l'aide de ces éléments, le gonflement du bois et l'évolution de la teneur en liquide au cours du temps d'imprégnation peuvent être analysés par corrélation d'images.



(a) (b)

Fig 1 : Dispositif d'imagerie a rayons X (a). Support étanche de l'echantillon (b).

Résultats

Des mesures régulières sont prises pendant plusieurs semaines pour chaque échantillon. L'atténuation des rayons pour chaque pixel (x,y) est calculée de la manière suivante :

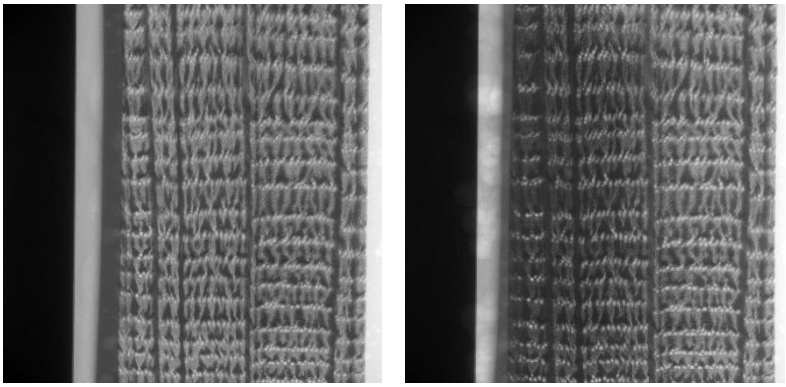
$$A_{(x,y)} = \frac{I_{(x,y)} - I_{DN\ (x,y)}}{I_{0\ (x,y)} - I_{DN\ (x,y)}}$$

Avec, I(x,y) l'intensité du faisceau transmis par l'échantillon

I_0(x,y) l'intensité du faisceau généré par la source à rayons X

I_{DN}(x,y) une mesure du détecteur sans rayons X

Le bruit des images obtenues est ainsi supprimé pour la suite du traitement (Fig 2).



Mise en contact 4 semaines d'imprégnation

Fig 2 : Images d'imprégnation d'un chêne Sessile à grain fin

La translation des éléments anatomiques du bois et le gonflement des parois cellulaires dû au transfert d'eau liée est mesurée suite à un traitement par corrélation d'images. Il est possible ainsi d'observer le front d'eau liée qui précède le liquide et qui se propage beaucoup plus profondément que le liquide. Puis par une calibration du dispositif (Bouali et al., 2012), l'atténuation des rayons X est reliée à la densité de matière traversée par la formule suivante.

$$\ln A_s = L_0\rho^* + L_1.\left(1 - \exp\left(-\frac{\rho^*}{\lambda}\right)\right)$$

L'imprégnation du liquide peut ainsi être suivie et la teneur en eau du bois peut être mesurée au cours du temps (Fig 3).

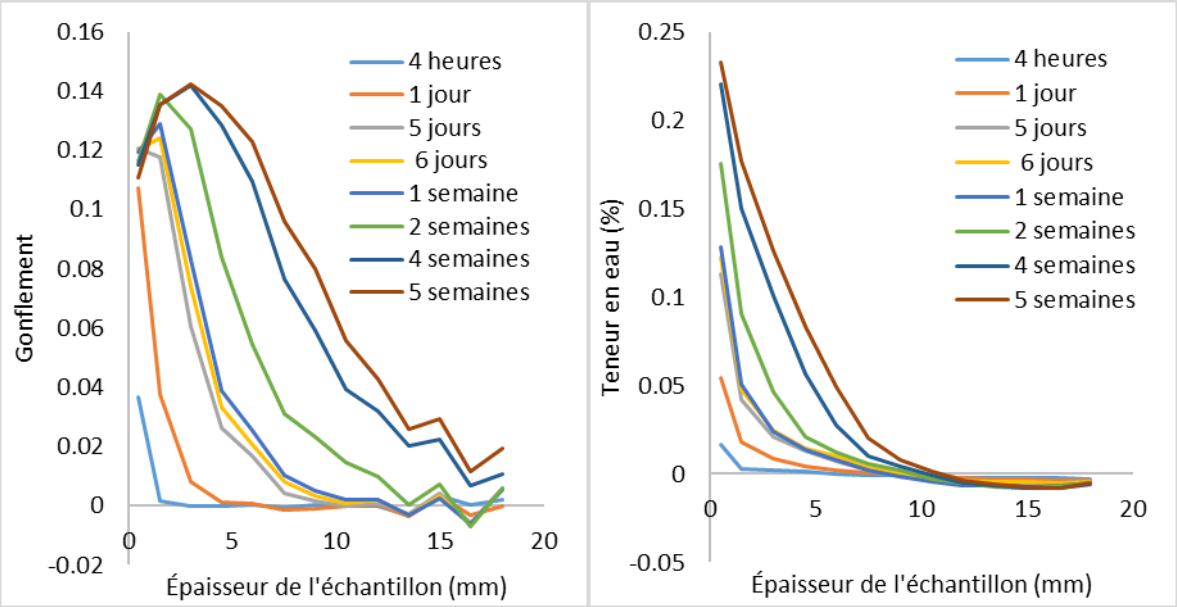


Fig 3 : Profondeur d'imprégnation d'une solution à 40% d'éthanol dans l'épaisseur de douelle

L'étude du gonflement du bois indique que l'eau liée aux parois cellulaires diffuse dans toute l'épaisseur de douelle, tandis que la solution sous forme liquide pénètre et stagne à 12mm dans l'épaisseur pour cet échantillon de chêne pédonculé à gros grain et non chauffé.

La profondeur et la vitesse d'imprégnation dépendent notamment de la nature du liquide, mais il est intéressant d'étudier l'effet des variations anatomiques du bois de chêne.

Conclusions et perspective

Ces premiers résultats sont satisfaisants. En utilisant cette méthode non destructive, le front d'imprégnation du liquide dans l'épaisseur de douelle peut ainsi être étudié suivant les différentes modalités du tonnelier. Le traitement numérique par corrélation d'images permet de traiter un nombre important d'échantillons.

Une prochaine expérimentation est prévue sur d'autres échantillons de chêne, et d'autres liquides d'imprégnation, en particulier un vin modèle. À cette nouvelle expérimentation s'ajoutera la mesure de l'oxygène dissous, élément clé pour la maturation des vins et spiritueux.

Références

Moutounet, M., Mazauric, J., Saint-Pierre, B., & Hanocq, J. (1998). Les échanges atmosphère/vin aux travers de la barrique. Vigne et Vin Publications Internationales.

Feuillat, F., Perrin, J. R., & Keller, R. (1994). Simulation expérimentale de “l’interface tonneau” : mesure des cinétiques d’imprégnation du liquide dans le bois et d’évaporation de surface. Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin, 28(N°3), 227–245.

Bouali, A., Rémond, R., Almeida, G., & Perré, P. (2012). Thermo-Diffusion in wood: X-Ray MC profiles analysed using a 2-D computational model. In 18th International Drying Symposium.

Poster B13

Nanometrology of Populus plant cell walls: Toward plant morphogenesis under abiotic stress

NORMAND Aubin[1,2], FARAHI Rubye[3], DAVISON Brian[4], PASSIAN Ali[3,4], CHARRIER Anne[2], LEREU Aude[1]

1 Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
2 Aix Marseille Univ, CNRS, CINaM, Marseille, France
3 Quantum Information Science, Computational Sciences and Engineering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, United States
4 BioEnergy Science Center (BESC), Biosciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, United States
aude.lereu@fresnel.fr

Mots clefs : Plant cell walls ; Nanomechanics ; Mechanical stress ; Atomic force microscopy

Context

Fundamental studies of plant cell walls are important for a better understanding of the plant response to its environment as a result of induced force fields, chemical and radiation exposure, and thermal effects. The correlation between the molecular traits of the cell walls and its morphological and mechanical characteristics is ultimately expressed in the plant response. However, the nanoscale behavior of many physical quantities, such as elasticity and plasticity, intimately connected with such a correlation, is largely unknown. As a result, how such molecular scale variations in the physical quantities of the cell walls translate into the bulk level and on to the whole organism level is not well understood. We propose to investigate poplar reaction wood induced by strong axis reorientation at early stage growth within one growth ring formed under mechanical stress (Fig. 1). Populus plant cell wall is studied for their 1- molecular distribution and heterogeneity, 2- morphology, and 3- mechanical properties, with the goal of obtaining a correlation among these studies.

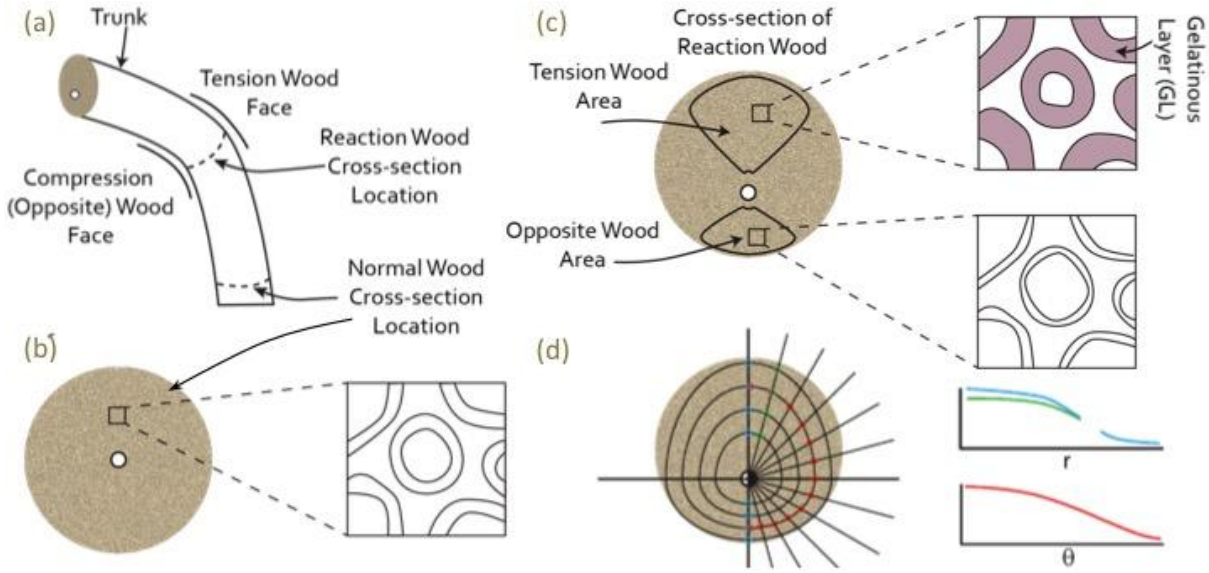


Fig 1 : (a) Reorientation under mechanical stress. Normal (b) versus reaction (c) wood showing the opposite and tension areas. (c) Tension and opposite tension areas for systematic investigations (d) along woody rays (r) and woody rings (θ).

Preliminary results

In a series of experiments using multi-modal atomic force microscopy (AFM) to carry out quantitative force mapping (QFM), mode synthesizing AFM (MSAFM) (Tetard, 2011) and hybrid photonic force microscopy (HPFM), we characterize cross sections of poplar for their mechanical and chemical properties, at nano- and micrometer length scales, as it goes through the chemical processing steps associated with delignification (Farahi, 2017; Charrier 2018). Beginning with untreated raw samples, we investigate the cell walls after removing extractives (extractive free), followed by holopulping and diluted acid treatment. We present high-resolution variations of structural modifications using AFM and the corresponding Young modulus (E), visco-plastic index (PI) and adhesion energy extracted from QFM mapping, as illustrated in Fig. 1. We observe that the nanomechanical properties of the cell walls, as lignin is removed through the delignification chemical process, expose a quantifiable reduction in E by a factor of 2 associated to lignin removal and by a factor of 10 at the final step where only cellulose remains. In addition, the PI is reduced by a decade at the final step (where hemicellulose is removed) to be compared to the 0.5 in average for the first three steps. Finally, we also evidence a modification of the chemical composition heterogeneities using adhesion energy mapping.

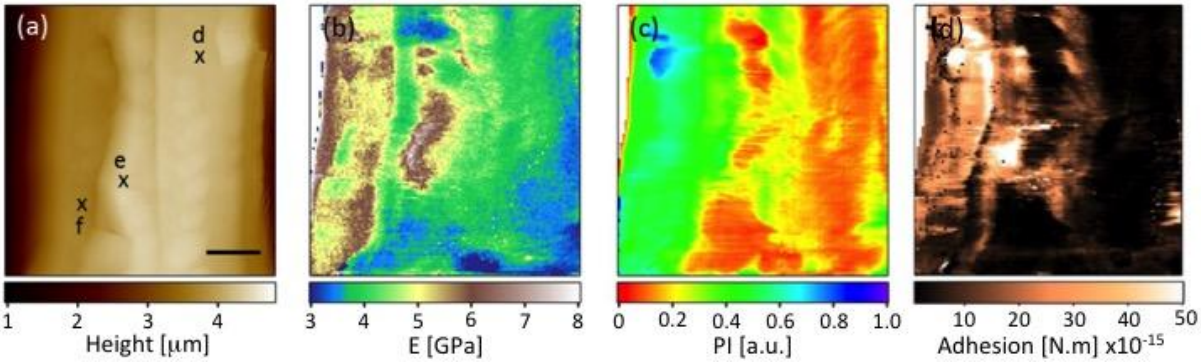


Fig. 2 : Topography (a) and corresponding mechanical properties mappings with the Young modulus E (a), the plastic index (c) and the adhesion energy (d) of PCW from normal wood

Ongoing research

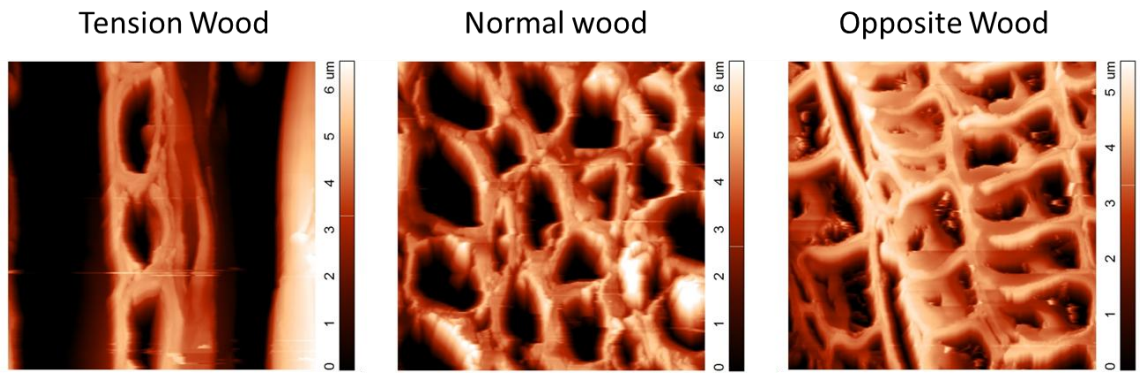


Fig 3 : 50x50 µm^2 topographic images using AFM of the tension, normal and opposite wood.

A strong axis reorientation at early stage growth results in reaction wood formed under mechanical stress (see Fig. 1). To apply the mechanical stress, a calibrated weight is imposed to the stem inducing curvature. We study the applied physical stress parameters limited to either a set of stress times at a given loading weight or a set of stress weights at a given exposure time. Specific regions are chosen along different stress directions to provide insights

on the modifications under normal, tension and opposite tension conditions (as illustrated in Fig. 1). The topographic images of Fig. 3 already illustrate the strong axis reorientation, elongation and compression of the tension and opposite wood compare to normal wood. The next step is to investigate the associated nanomechanical properties.

Acknowledgment

The project is funded by Excellence Initiative of Aix Marseille University A*MIDEX, a French “Investissements d’Avenir programme”. This work was also sponsored in part by the BioEnergy Science Center (BESC) of the Oak Ridge National Laboratory (ORNL). The BESC is a US Department of Energy (DOE) Bioenergy Research Center supported by the Office of Biological and Environmental Research in the DOE Office of Science.

References

Charrier A., Lereu A.L., Farahi R.H., Davison B.H., Passian A. (2018) Nanometrology of Biomass for Bioenergy: The Role of Atomic Force Microscopy and Spectroscopy in Plant Cell Characterization, Frontiers in Energy Research 6, 11

Farahi R.H., Charrier A., Tolbert A., Lereu A.L., Ragauskas A., Davison B.H., Passian A. (2017) Plasticity, elasticity, and adhesion energy of plant cell walls: nanometrology of lignin loss using atomic force microscopy, Scientific reports 7, 152

Tetard L., Passian A., Farahi R.H., Davison B.H., Jung S., Lereu A.L., Ragauskas A.J., Thundat T. (2011) Nanometrology of delignified Populus using mode synthesizing atomic force microscopy, Nanotechnol. 22, 465702

Poster B14

Diagnostic mécanique par mesures vibratoires à l'échelle de l'arbre de l'efficacité et de la pérennité de la fonction de protection des forêts

CROS Vivien[1], BOURRIER Franck[1], BARRÉ Jean Baptiste[1], BERGER Frédéric[1]

[1] Université Grenoble Alpes, IRSTEA, UR LESSEM, 2 rue de la Papeterie-BP 76, F-38402, St-Martin-d'Hères, France
vivien.cros@irstea.fr

Mots clefs : biomécanique de l'arbre ; analyse vibratoire ; méthodes éléments finis ; forêt de protection

Contexte et Objectif

Les forêts de montagne jouent un rôle essentiel dans la protection contre les aléas naturels (Dorren et al, 2005). Ces peuplements requièrent une vigilance particulière pour assurer la pérennité de leur fonction de protection. L'enjeu est de garantir un niveau de protection suffisant dans le temps et, par conséquent, d'évaluer précisément la fonction de protection apportée par un peuplement. Cette évaluation repose en grande partie sur le diagnostic physiologique et mécanique des individus qui le composent. Le diagnostic mécanique repose aujourd'hui sur des méthodes fournissant une information partielle ou incompatible avec les contraintes du terrain. Ainsi, le développement d'une méthodologie de diagnostic mécanique de l'arbre à l'aide de mesures non destructives constitue un réel intérêt pour l'évaluation de la fonction de protection des forêts et de leur pérennité. Un tel diagnostic doit permettre l'évaluation de l'ancrage racinaire et de l'état mécanique du tronc.

L'objectif de ce projet de thèse est de développer une méthodologie, basée sur l'utilisation de mesures vibratoires, pour le diagnostic mécanique de l'efficacité et de la pérennité de la fonction de protection à l'échelle de l'arbre.

Méthode proposée

L'utilisation de l'analyse vibratoire pour quantifier les propriétés mécanique a déjà été investiguée sur des troncs d'arbres (Legg, 2016; Barré, 2018). Les résultats obtenus dans ces études mettent en évidence la pertinence de l'approche vibratoire dans cette configuration tout en spécifiant les limites. L'enjeu est de savoir s'il est possible d'établir un diagnostic mécanique d'arbres à la géométrie simple tel que les résineux à partir de mesures vibratoires, de grandeurs dendrométriques et de relations allométriques. Il est ainsi proposé d'atteindre cet objectif de la manière suivante :

Développement d'un modèle aux éléments finis détaillés

La réponse vibratoire d'un arbre est extrêmement complexe de par l'influence de sa géométrie, de ses propriétés mécaniques et de son ancrage au sol. Dans le cas de l'arbre de milieu ouvert caractérisé par une architecture plus complexe avec de nombreuses branches, les propriétés du matériau jouent un rôle limité dans la réponse dynamique (James, 2014). Pour les arbres à la géométrie plus simple tel que les résineux qui peuplent majoritairement les forêts de protection, ce résultat n'est pas évident et demande à être confirmé. Par ailleurs, la compréhension précise de la réponse vibratoire est essentielle pour analyser en détail les mesures réelles. Ainsi, il est envisagé de développer un modèle numérique aux éléments finis afin de déterminer les grandeurs d'influences dans la réponse dynamique d'un arbre de type résineux.

Développement d'un modèle simplifié

Si l'usage des éléments finis permet d'obtenir des résultats très pertinents, la méthode reste néanmoins couteuse en termes de moyens et de temps. Dans la perspective d'une généralisation d'une méthode de caractérisation de l'arbre par essais vibratoires, le développement de modèles simplifiés basés sur des approches énergétiques est envisagé (Lalanne et al, 1984). L'analyse jointe des résultats de ces modèles sera menée de manière à définir un modèle constituant un compromis entre qualité de l'estimation des paramètres clefs et complexité de mise en œuvre.

Chacun de ces modèles numériques fera l'objet d'un travail de calibration/validation à partir de mesures vibratoires effectuées directement sur l'arbre sur pied ainsi qu'à partir des propriétés mécaniques mesurées sur des éléments constitutifs de l'arbre (tronc, branches charpentières) une fois abattu. Cette phase expérimentale du projet de thèse a fait l'objet d'une expérimentation exploratoire au cours de l'été 2018 afin de valider le mode opératoire. Cette expérimentation est présentée en synthèse ci-dessous.

Expérimentation préalable

Dans la perspective de ce projet de thèse, une expérimentation a été mise en place afin d'identifier les caractéristiques dendrométriques adaptées et d'évaluer la faisabilité des mesures. Des mesures vibratoires ont ainsi été effectuées sur 17 épicéas situés dans la forêt domaniale de Vaulnavey le Haut (Isère). Les individus avaient un diamètre moyen de 12cm et une hauteur moyenne de 10m. Chaque arbre a été soumis à un choc au maillet et sa réponse vibratoire enregistrée à l'aide d'un accéléromètre piézoélectrique uniaxial placé à son pied. Ces mesures ont été réalisées sur l'arbre complet puis avec un élagage partiel du houppier (élagage sur 6 à 7 m de hauteur) et enfin sur le tronc totalement ébranché. Ces différentes modalités ont été envisagées pour obtenir un gradient de complexité dans les réponses spectrales.

L'analyse du signal doit être ajustée sur une période du signal éloignée temporellement de l'impact. Dans ces conditions, la transformée de fourrier du signal permet d'identifier les différents modes de vibration. Des modes de vibration hors plan peuvent toutefois apparaitre et rendent difficile l'identification des modes d'intérêt. Les résultats préliminaires montrent que les fréquences moyennes des quatre premiers modes propres de vibration s'échelonnent entre 2.2 et 44.6 Hz pour l'arbre entier et entre 1.7 et 25.6 Hz pour le tronc. Ces premiers résultats confirment l'adéquation du compromis retenu entre la taille des arbres et leur âge pour mener à bien les futures expérimentations. Le capteur piézoélectrique n'est en revanche pas adapté à la mesure des premiers modes de vibrations dont la fréquence est inférieure à 5 Hz. Une méthode de mesure alternative doit être envisagée pour les très basses fréquences.

Remerciements

Ce projet de thèse est financé par le projet Interreg Alpine Space *GreenRisk4Alps*.

Références

Barré, J.B., Bourrier, F., Brancheriau, L., Bertrand, D., Rey, F. (2018), "Effects of fungal decay on elasticity and damping of small-diameter silver fir logs assessed by the transverse vibration resonant method." Wood Science and Technology, 52 (2), pp. 403-420.

Dorren, L.K.A., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P. (2005) Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. Forest Ecology and Management, 215 (1-3), pp. 183-195.

James KR, Dahle GA, Grabosky J, Kane B, Detter A. (2014) Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics. Arboriculture & Urban Forestry. 40(1):1-15.

Lalanne Michel, Berthier Patrick, Der Hagopian Johan. (1984) Mechanical Vibrations for Engineers. John Wiley & Sons Inc. ISBN-10: 0471901970.

Legg, Mathew, and Stuart Bradley. (2016) "Measurement of Stiffness of Standing Trees and Felled Logs Using Acoustics: A Review." *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 139, no. 2, pp. 588–604., doi:10.1121/1.4940210.

Poster B16

Caractérisation 3D multi-échelles de la microstructure du liège aggloméré

LE BARBENCHON Louise[1], GIRARDOT Jérémie[1] , KOPP Jean-Benoît[1], VIOT Philippe[1]

[1]Arts et Métiers ParisTech, CNRS, I2M Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, F -33405 Talence Cedex,France
louise.le_barbenchon@ensam.eu

Mots clefs : Liège aggloméré ; Matériaux cellulaires ; Multi-échelles ; Micro-tomographie à rayons X ; Corrélation d'images numériques

Contexte et Objectifs

En raison des préoccupations émergentes au sujet du réchauffement de la planète et donc de l'empreinte carbone, la demande de matières bio-sourcées augmente actuellement. Le liège étant une mousse polymère naturelle, il présente un ensemble unique de propriétés (résistance au feu, absorption d'énergie, isolation phonique...). C'est donc un excellent candidat pour un large éventail d'applications. Pour réduire la variabilité causée par la dépendance environnementale (temps, lieu de culture, saison de récolte), un sous-produit du liège - liège aggloméré - est préféré pour les applications mécaniques. Il permet également de dépasser l'anisotropie du liège naturel en arrangeant au hasard l'orientation des cellules hexagonales du liège et de mouler des pièces à géométrie plus complexe.

Depuis 10 ans, peu d'études se sont penchées sur le comportement mécanique de ces matériaux dans le cadre d'essais quasi statiques et de chocs. Étant ses applications envisagées, ils se sont concentrés sur le comportement en compression des agglomérats de liège. Ils ont démontré l'influence de la vitesse moyenne de déformation, de la taille des granulés de liège, du type de résine ou de la densité du matériau sur l'énergie absorbée, la force de contact maximale ou le pic d'accélération maximal. La microstructure du liège naturel a elle été bien étudiée. Cependant, celle du liège aggloméré n'est pas encore entièrement décrite, même si elle pourrait fortement influencer son comportement mécanique et ses mécanismes de déformation spécifiques.

L'objectif de ce travail est d'étudier avec plusieurs techniques la microstructure des agglomérats de liège et de commencer à la mettre en lien avec le comportement mécanique du matériau.

Matériel et Méthodes

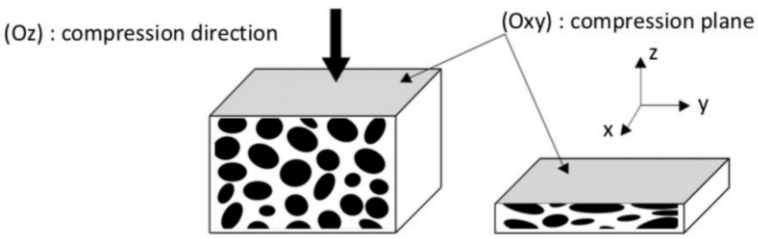


Fig.1 - Processus de fabrication du liège aggloméré

Le liège est une mousse polymère naturelle qui présente une structure à cellules fermées. Pour obtenir du liège aggloméré, le liège naturel est broyé et tamisé pour le classer par taille. Dans cette étude, les grains (ø = 0.5 à 1 mm) sont mélangées avec une résine thermodurcissable. Il est ensuite compressé uniaxialement en un bloc de 1000 x 500 x150~mm 3 à une densité de

0.42. Cette compression provoque une orientation préférentielle qui sera examinée plus en détail dans cet article. Fig. 1 montre les deux directions induites : les directions dans le plan (Oxy) seront arbitrairement appelées directions dans le plan et la direction (Oz) sera appelée direction hors plan. Ensuite, la polymérisation se fait en autoclave. Des plaques sont ensuite usinées à partir du bloc.

Le matériau est d'abord étudié avec un microscope optique Keyence. Avec le logiciel libre ImageJ, l'analyse d'images est réalisée en simplifiant les granulés par ellipses (Fig.2). Les paramètres géométriques de ces ellipses sont ensuite utilisés pour calculer le rapport d'aspect (AR) et l'orientation des granulés. Les échantillons de MEB sont coupés avec une lame de rasoir remplacée à chaque coupe afin d'endommager le moins possible les parois cellulaires comme précisé par Gibson (1981). Des échantillons sont ensuite observés avec un MEB (Zeiss EVO HD 15). Une tension accélérée de 10 keV est utilisée avec un courant de 100 pA. Les deux directions du liège sont étudiées.

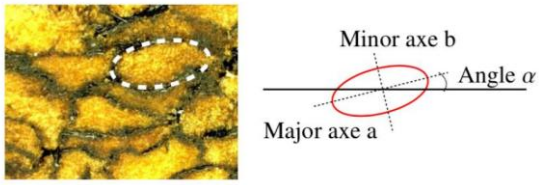


Fig.2 - Assimilation d'un grain de liège à une ellipse

Les deux méthodes précédentes n'impliquaient qu'une analyse de surface et non une analyse complète de la microstructure 3D. Un biais peut également être introduit par étapes de découpe (déformation des cellules, dégradation des interfaces,...) en raison de la très faible densité et de la porosité élevée du matériau. C'est pourquoi la tomographie est pratiquée.

Le principe général de la technique de tomographie par rayons X a été décrit dans de nombreux articles, notamment par Maire (2001). Un échantillon est utilisé pour deux résolutions de rayons X (Fig.3). La première résolution à 8.5 µm\voxel donne la structure à l'échelle du granulat. Après cette première analyse, un échantillon en est découpé à des dimensions plus petites pour obtenir une résolution de 2.5 µm\voxel pour étudier l'échelle cellulaire.

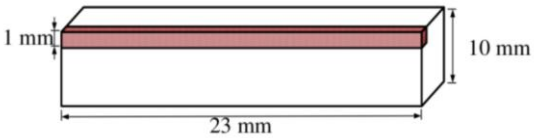


Fig.3 - Échantillon de micro-tomographie à rayons X

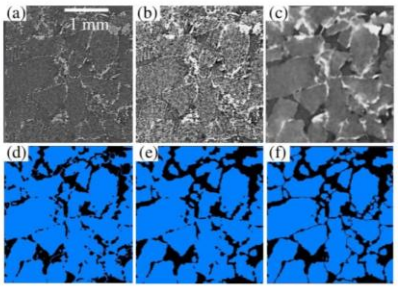


Fig.4 -Post-traitement à l'échelle du grain. (a) Image brute. (b) Égalisation d'histogramme. (c) Filtre médian. (d) Seuillage. (e) Ouverture. (f) Segmentation.

L'algorithme d'analyse post-traitement des données tomographiques est réalisé grâce au logiciel Amira-Avizo pour calculer les paramètres quantitatifs et obtenir la reconstruction 3D (Fig.4).

Résultats & Discussions

Les techniques d'observation 2D, microscopie optique et microscopie électronique à balayage donnent des informations différentes sur le matériau. Fig.5 montre que selon le grossissement et la technique, les choses observées ne sont pas les mêmes. C'est pourquoi trois grandes échelles sont définies dans cet article.

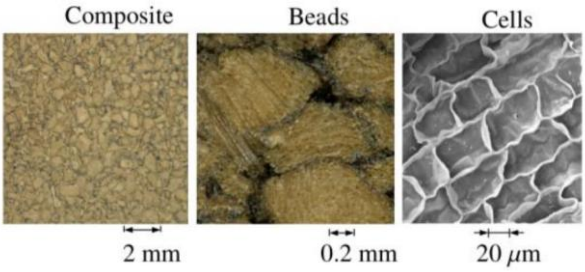


Fig.5 - Structure multi-échelles du liège aggloméré

L'échelle de la structure est l'échelle de l'aggloméré. Lors d'une sollicitation mécanique, il donne des informations sur le comportement mécanique à travers les courbes Force/Déplacement et les paramètres mécaniques associés (comme le module de Young ou l'énergie absorbée). L'échelle du grain (bead) est un granule de liège millimétrique. Les porosités entre grains, les interfaces entre granulés, l'orientation des grains, ... sont des paramètres qui peuvent influencer les mécanismes à cette échelle.

Un grain de liège est un matériau cellulaire. C'est pourquoi il existe une échelle plus petite. En effet, la taille des cellules du liège est de quelques dizaines de microns. L'échelle de la cellule concerne la façon dont les parois cellulaires se déforment lors d'une charge spécifique, la géométrie de la cellule ou la phase gazeuse piégée à l'intérieur, ….

C'est pourquoi la structure multi-échelle des agglomérats de liège, déjà étudiée pour le liège naturel et d'autres mousses polymères, est mise en évidence comme par Viot (2007). Comme chaque échelle pourrait s'influencer mutuellement et avoir un effet sur les mécanismes de déformation, chacune d'entre elles doit être rapportée avec prudence.

L'analyse des images a permis de convertir les grains en ellipses. Il a confirmé que les granulats dans le plan ont principalement leur axe principal orienté à 0° alors que les granulats hors plan sont orientés de façon aléatoire (Fig. 6).

L'orientation des granulés a également été étudiée grâce à la tomographie par rayons X. L'orientation des grains de liège 3D est caractérisée par deux angles phi et theta. Fig. 7 montre la valeur de ces angles. Les valeurs thêta sont réparties également. Au contraire phi semble se situer essentiellement autour de 70 et 90°. Cela signifie que les billes ont une orientation aléatoire dans le plan (Oxy) alors que dans les plans (Oxz) ou (Oyz) elles ont tendance à être alignées avec les directions dans le plan.

Les résultats de la microscopie optique sont ensuite étayés par ceux de la micro-tomographie. D'autres précieuses informations concernant la taille moyenne des cellules, des grains et des porosités, leur forme ainsi que leur orientation ont également pu être étudiées attentivement afin de décrire précisément la micro-structure du liège aggloméré.

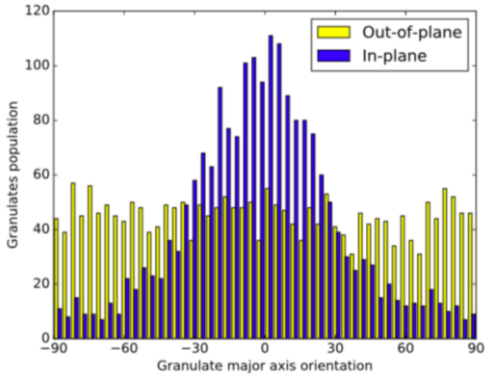


Fig.6 – Distribution de l'orientation des ellipses à partir des observations surfaciques

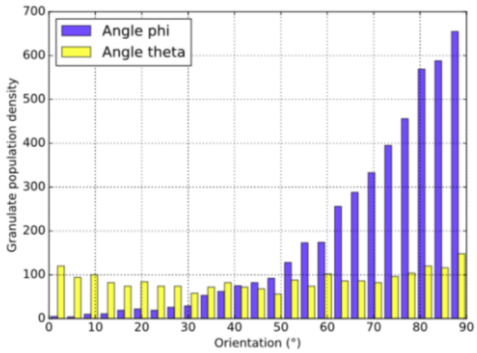


Fig.7 - Distribution de l'orientation spatiale des grains

Conclusions

Grâce à différentes techniques d'imagerie, la structure multi-échelles du liège aggloméré a été mis en évidence. De plus ces outils ont également permis de fournir des données qualitatives ainsi que quantitatives aux différentes échelles. L'anisotropie transverse du liège aggloméré fabriqué par compression uni-axiale a également été étudié.

La suite de ce travail est d'étudier la relation micro-structure/comportement mécanique lors de sollicitations en régime quasi-statique mais également dynamique. Pour cela, la microstructure sera étudiée grâce à la micro-tomographie. De plus, de la corrélation d'images numériques permettra d'étudier les hétérogénéités de déformations causées par la structure du liège aggloméré.

Remerciements

Les auteurs remercient la société Lièges HPK d'avoir fourni le liège aggloméré.

Références

Gibson, L. J., Easterling, K. E., Ashby, M. F. (1981) The Structure and Mechanics of Cork, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 377, pp. 99-117.

Maire, E., Buffière, J. Y., Salvo, L., Blandin, J. J., Ludwig, W.,Létang, J. M. (2001) On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science, Advanced Engineering Materials, vol. 3, pp. 539 - 546

Viot P., Bernard D. (2007) Multi-scale foam behaviour characterisation, Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation III, vol. 1, pp. 197-206

Poster B17

Propriétés des fissures lors du déroulage du hêtre en fonction de la température et de la pression

ALTEYRAC Jérôme[1,2], DENAUD Louis[2], VIGUIER Joffrey[2]

[1]LabECAM, ECAM Lyon, 40 Montée St Barthélemy, Lyon 69321 Cedex 5, France,
[2]LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech, LaBoMaP, 71250 Cluny, France
jerome.alteyrac@ecam.fr

Mots clefs : Hêtre, fissures, placages, déroulage, température, pression

Introduction

Les caractéristiques des fissures de déroulage, à savoir l'orientation, la longueur et la largeur, ont été étudiées en fonction de leur importance pour le processus de collage et les propriétés mécaniques des produits à base de placage. Cette étude a montré que la température d'étuvage et le taux de compression, pendant le processus de déroulage, influaient de manière significative sur les caractéristiques des fissures à la surface des placages de hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Huit billons de hêtre européens ont été étuvés dans un réservoir d'eau à deux températures distinctes, 50 et 70 ° C. Après étuvage, les billes ont été immédiatement déroulées avec la dérouleuse du laboratoire (SEM S500) pour obtenir un placage de 3,5 mm d'épaisseur avec des taux de pression de 0, 5, 10 et 15%. Les caractéristiques de la fissure apparaissant à la surface inférieure du placage ont été mesurées manuellement le long du bord du placage en utilisant le SMOF©. Les résultats ont montré une forte corrélation négative entre la longueur de la fissure et la distance entre fissures. On constate qu'une température plus élevée et une pression plus élevée ont conduit à des fissures plus courtes. L'orientation des fissures montre qu'elle s'étend d'un angle de 50 ° (P = 15%; T = 70 ° C) à 67 ° (P = 5%; T = 50 ° C) par rapport à l'horizontale. L'orientation des rayons a été considérée comme co-variable et n'a montré aucun effet significatif sur les caractéristiques des fissures.

Matériels et méthodes

Huit (8) billons de 850 mm de diamètre maximum de 520 mm ont été utilisés dans cette étude. Les grumes à l'origine de ces billons proviennent de hêtres européens (*Fagus sylvatica* L.) fraîchement abattus et récoltés dans la forêt domaniale de Cluny. Ils ont été étuvés dans un réservoir d'eau jusqu'à ce que leur température atteigne les deux niveaux, 50 ° C ou 70 ° C. Ces températures ont été choisies car elles encadrent la gamme habituellement utilisée dans l'industrie. Après avoir étuvé les billons, ils ont été immédiatement déroulés. Une dérouleuse (SEM S500 - longueur du couteau 900 mm) équipée d'une barre de pression angulaire a été utilisée pour obtenir des placages de 3,5 mm d'épaisseur, une épaisseur couramment utilisée, avec une vitesse de coupe de $2ms^{-1}$.

Les taux de compression utilisés dans cette étude ont été fixés à 0, 5, 10 ou 15% de l'épaisseur nominale du placage. Immédiatement après le déroulage, une bande de 80 mm de largeur a été sciée dans le placage. Le côté de cette bande destiné à être observé a été dégauchi. Cette opération permet de mettre en évidence lesfissures et fiabilise la détection.

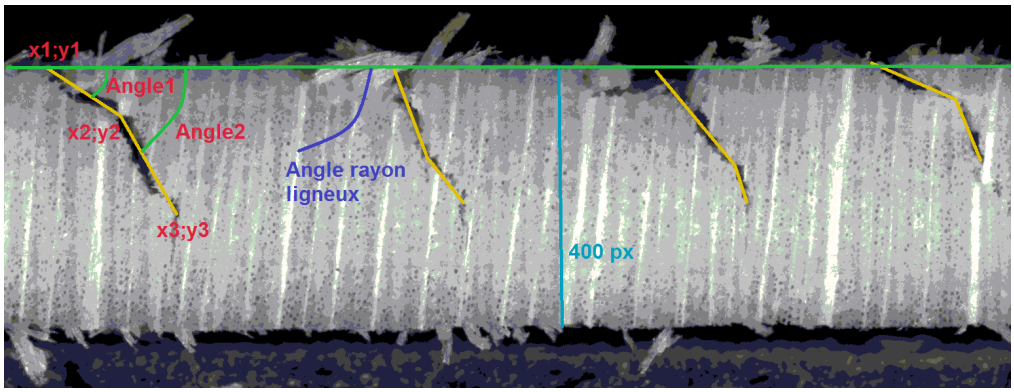


Fig. 1 : Vue latérale du placage. Chaque fissure est caractérisée par trois points (deux segments) et leurs angles par rapport à l'horizontale. L'angle des rayons ligneux est également mesuré.

Tous les points (Figure 1) sont placés manuellement directement sur la photo. Le premier et le troisième point sont le début et la fin de la fissure, tandis que le point central se situe au point d'inflexion lorsque la fissure est courbe. Les coordonnées de ces trois points (x1, y1; x2, y2 et x3, y3) ont ensuite servi à calculer les huit variables suivantes (tableau 1):

Tab. 1 : Caractéristiques des fissures

Nom de la variable	Description
Longueur 1 (pixel)	Longueur du premier segment
Longueur 2 (pixel)	Longueur du deuxième segment
Longueur (pixel)	Somme des deux segments
Angle 1 (°)	Angle du premier segment
Angle 2 (°)	Angle du deuxième segment
Profondeur de la fissure (%)	Distance relative entre la ligne horizontale et le bout de la fissure ; (y_3-y_1)/épaisseur
Largeur de la fissure (pixel)	Distance horizontale du début à la fin de la fissure; x_3-x_1
Distance entre fissure (pixel)	Distance horizontale d'une fissure à la suivante; x_1 (i+1) – x_1 (i)

Les analyses statistiques ont été traitées dans SAS afin de tester les effets de T (50°C et 70°C), P (0%, 5%, 10% et 15%) et leur interaction. Les classes de température et de pression ont été déterminées avec un test de Duncan à 5% de degré de signification.

Résultats et discussions

Les valeurs moyennes des caractéristiques sont reportées dans le tableau 2.

Tab. 2 : Caractéristiques des fissures

Nom de la variable	N	Moyenne	Dev Std	Minimum	Maximum
Profondeur de la fissure (%)	3580	35.41	14.14	7.08	82.53
Distance entre fissures (px)	3548	553.12	777.20	74.66	14132.00
Largeur de la fissure (px)	3580	120.32	60.63	0.00	372.00
Longueur de la fissure (px)	3580	193.85	79.74	48.98	471.03
Angle 1 (°)	3580	44.25	14.30	12.45	103.20
Angle 2 (°)	3580	57.89	14.25	14.03	97.97

Pour comparaison, l'épaisseur moyenne des placages est de 400 (± 20) Px.

Tab. 3 : Effet de la température et de la pression sur les caractéristiques des fissures

Nom de la variable	Augmentation de la température*	Augmentation de la pression*
Longueur de fissure (px)	↘	↘
Angle 1 (°)	↘	↗
Angle 2 (°)	↘	↗
Profondeur de fissure (%)	↘	↘
Largeur de fissure (px)	↗	↘
Distance entre fissures	↗	↗

* les flèches ↗ et ↘ indiquent l'effet de la variable. Effets significatifs à 5% (test de Duncan) entre les groupes T=50°C et T=70°C pour la température, et les groupes P=0% et P=15% pour la pression.

Les résultats obtenus (Tableau 3) montrent que l'augmentation de la température d'étuvage des billons diminue significativement la profondeur des fissures de 39 à 32% de l'épaisseur du placage. De même, l'augmentation de la pression de la dérouleuse a réduit la profondeur des fissures de 43 à 26%. Il apparait donc qu'une pression élevée combinée à une température élevée entraîne une diminution de la profondeur des fissures, qui est une caractéristique de qualité requise pour un bon placage.

Ces observations sont cohérentes avec d'autres études menées dans des conditions similaires (Dupleix *et al.* 2013; Rohumaa, Antikainen *et al.* 2016, Rohumaa *et al.* 2018).

Conclusion

Le but de ce travail était de déterminer l'effet de l'étuvage et du taux de pression lors du déroulage sur les caractéristiques des fissures. Deux températures de 50 ° C, 70 ° C et quatre pressions de 0, 5, 10 et 15% ont été étudiées.

L'interaction de T et P, et les effets de T et P ont été testés dans un modèle GLM pour six variables; longueur de fissure, profondeur de fissure, angle 1, angle 2, largeur de fissure et distance entre fissures. Sur les variables angle 1, angle 2 et largeur de fissures on a observé que les effets de T et P sont opposés et se traduisent statistiquement par une interaction significative.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Bourgogne Franche-Comté et Pollmeier pour le soutien financier. Les auteurs souhaitent également remercier la plate-forme technique Xylomat du réseau scientifique Xylomat financé par ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST.

Références

Dupleix Anna, Louis-Etienne Denaud, Laurent Bleron, Rémy Marchal, and Mark Hughes (2013) The Effect of Log Heating Temperature on the Peeling Process and Veneer Quality: Beech, Birch, and Spruce Case Studies. European Journal of Wood and Wood Products 71(2): 163–171.

Rohumaa Anti, Toni Antikainen, Christopher G. Hunt, Charles R. Frihart, and Mark Hughes (2016) The Influence of Log Soaking Temperature on Surface Quality and Integrity Performance of Birch (*Betula Pendula* Roth) Veneer. Wood Science and Technology 50(3): 463–474

Poster B17

Rohumaa, A., Viguier, J., Girardon, S., Krebs, M., and 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, 1-9.

Poster B18

Les conséquences du procédé de fabrication sur les propriétés des panneaux contreplaqués

VIDAL Marcia[1], DENAUD Louis[2], VIGUIER Joffrey[2], CHARRIER Bertrand[3]

[1]ECAM Lyon, 40 Montée Saint-Barthélémy, 69321 Lyon
[2] ENSAM LaBoMaP, rue Porte de Paris, 71250 Cluny
[3] IUT des Pays de l'Adour, 371 rue du ruisseau, 40004 Mont de Marsan
marcia.vidal@ecam.fr

Mots clefs : panneaux contreplaqués, fabrication des panneaux, adhésif, mouillabilité

Résumé

Le but de ce travail est de fournir les conséquences du procédé de fabrication sur les propriétés des panneaux contreplaqués. Cet état de l'art a révélé que plusieurs travaux ont étudié l'influence de différents paramètres sur les placages à des étapes spécifiques de la fabrication du panneau contreplaqué. L'importance de la recherche des combinaisons les plus optimales des différents paramètres afin de prédire les propriétés physiques et mécaniques a ainsi été mise en évidence. Les recherches sur l'étape d'encollage mettent en évidence l'effet du type d'adhésif et des fissures de déroulage sur la qualité d'adhésion. Pour cette raison, une recommandation particulière est faite pour établir une relation entre les fissures de déroulage et l'étape d'encollage par des tests comme la détermination de la mouillabilité. Cette étude montre le manque d'informations ou d'études sur la prise en compte du procédé de fabrication dans son ensemble.

Introduction

La production totale de panneaux contreplaqués en 2017 pour la France fut de 249 000 m^3 et la production totale de placages a augmenté de 2% par rapport à l'année dernière (Memento 2018). Avec toutes les espèces confondues, le panneau contreplaqué est principalement utilisé dans le secteur de la construction avec 50% de la consommation. Il s'emploie également pour des applications spécifiques telles que le transport (plancher du TGV, planchers et aménagement intérieur de véhicules et remorques) ou encore la construction nautique (structure et agencement intérieur), qui permettent d'exploiter pleinement les caractéristiques qualitatives du produit : solidité, légèreté, rigidité, flexibilité, durabilité et résistance à l'humidité. (UIPC 2018)

Comme il est montré dans la Fig. 1, les panneaux contreplaqués comportent de nombreuses étapes de fabrication. Chaque étape peut influencer l'aptitude au collage des contreplaqués. Ces dernières années, les chercheurs et les industriels ont étudié l'effet de différents paramètres sur les propriétés chimiques, mécaniques et physiques d'un panneau de contreplaqué mais rarement en liant procédé, mouillabilité et tenue du jointe de colle. Nous citons les principaux résultats de ces études:

Étuvage et traitement à la vapeur

Les grumes sont préchauffées dans un bassin d'eau chaude ou bien à l'aide de la vapeur pour faire monter sa température et ainsi faciliter le déroulage.

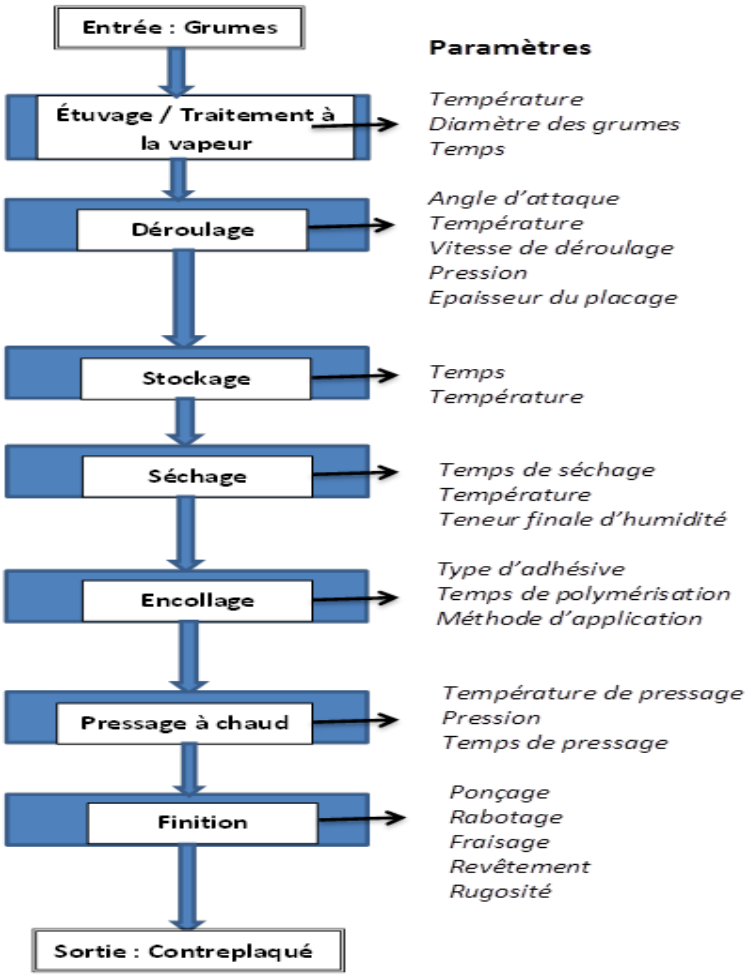


Fig. 1 : Procès de fabrication des panneaux contreplaqués et les paramètres associés à chaque étape

Des fissures lors du déroulage ont été étudiées par Dupleix et al. (2013) sur le hêtre, l'épicéa et bouleau à l'aide du dispositif SMOF (Système de Mesure de l'Ouverture des Fissures). Les résultats ont montré que les basses températures produisent des placages avec des fissures plus profondes et plus espacées que les températures plus élevées. La relation sur les propriétés mécaniques n'a pas été évaluée dans cette étude mais d'autres travaux l'ont fait comme Pot et al. (2015).

Déroulage

Les grumes sont déroulées pour la production des placages puis ces derniers sont massicotés et triés en fonction de leur qualité et leur teneur en humidité. S'il est nécessaire, certains défauts sont éliminés dans cette étape (Wilson J. & Sakimoto E. 2005).

Les fréquences spatiales des fissures lors du déroulage ont été étudiées par Pot et al. (2015) sur des panneaux LVL de hêtre avec quatre pressions de déroulage différentes (0%, 5%, 10% et 15%). La largeur et la profondeur des fissures ont également été évaluées par le dispositif SMOF (Système de Mesure de l'Ouverture des Fissures). Un modèle numérique basé sur les méthodes des éléments finis (FEM dans son acronyme en anglais) a été développé pour prédire l'effet des fissures sur les propriétés mécaniques élastiques. Spécifiquement, le module

local et le module global ont été calculés dans les fissures avec et sans l'application d'adhésif en flexion. Dans cette étude, les fissures avec adhésif ont une incidence sur la valeur du module global obtenu.

Rohumaa et al. (2018) a démontré que l'étape de déroulage a une influence sur la profondeur des fissures et de leur fréquence. Il a déterminé qu'un déroulage optimal se produit à une température d'étuvage de 70 °C et 80 °C et à un taux de compression de 15%.

Stockage

Les conditions de stockage doivent être optimales pour éviter l'apparition de défauts en surface des placages. Cela signifie que l'humidité relative et la température ambiante doivent être contrôlées et idéalement inchangées. Le temps de stockage est ainsi également un autre facteur à prendre en compte. Outahyon (2008) a confirmé que le temps de stockage a une incidence sur la mouillabilité des placages.

Séchage

Jamalirad et al. (2012) ont étudié les effets d'un séchage à haute température sur la qualité d'adhésion du placage de hêtre (Fagus orientalis L.). Les conclusions de cette étude ont été que l'augmentation de la température de séchage et de l'irradiation UV (UltraViolet) entraînait certains phénomènes tels que la modification de la couleur du bois. En fait, comme il a été indiqué par Charrier et al. (1995) les réactions chimiques des polymères du bois modifient la couleur du bois pendant les étapes de traitement à la vapeur et le séchage. Ces réactions sont fréquemment décrites comme une oxydation et une condensation des substances extractives phénoliques et de la lignine.

Encollage et pressage

Les placages sont encollés avant d'être pressés à chaud.

Un test de mouillabilité peut fournir beaucoup d'informations sur l'état de la surface d'un placage et sur la qualité de liaison avec un adhésif spécifique. Le test de mouillabilité permet d'estimer l'énergie de surface du placage et ainsi sa résistance à la pénétration de l'adhésif. L'addition d'une goutte d'eau (ou d'un adhésif) sur la surface du bois et la vitesse à laquelle cette goutte (ou cet adhésif) s'étale sur la surface sont ainsi de bon indicateurs de l'adhérence entre le bois et l'adhésif et son comportement mécanique ultérieur. (Frihart C. & Hunt C. (2010)).

L'anatomie du bois joue un rôle important dans la pénétration de l'adhésif (Liu et al. (2018)). Dans le cas des résineux, la plupart des trachéides s'écrasent (collapse) sous l'effet d'un procédé THM (pour son acronyme en anglais Thermo-Hydro-Mechanical). Dans cette étude, cette action n'a pas provoqué la fracturation des cellules du bois mais elle a réduit les cavités cellulaires. Les résultats de ce travail ont montré que le procédé THM a diminué la porosité du bois et a amélioré la résistance au cisaillement de la ligne de colle.

Finition

Les panneaux de contreplaqué sortant de la presse sont sciés aux dimensions appropriées.

Outahyon (2008) a conclu que les adhésifs polyuréthanes (PUR) et mélamine-urée-formaldéhyde (MUF) avaient une meilleure adhérence sur les surfaces poncées. Il est important de noter que plusieurs études (Kuljich et Cool (2013)) ont montré que les adhésifs mouillent et adhèrent mieux aux surfaces poncées.

Conclusions

Les étapes de fabrication et les paramètres associés jouent un rôle important dans la qualité finale des panneaux contreplaqués. La température d'étuvage active la surface du bois par oxydation ou migration des extractibles qui nuisent à la qualité de la liaison ultérieure avec l'adhésif. Le test de mouillabilité peut nous fournir des informations concernant la qualité de la surface des placages et de sa résistance à la pénétration de l'adhésif. Le contrôle de ces paramètres nous apporte des connaissances fondamentales qui vont nous permettre une meilleure compréhension des propriétés physiques et mécaniques obtenues sur l'un des matériaux composites à base de bois les plus émergents sur le marché français ces dernières années.

Références

Charrier B, Haluk JP, Metche M. (1995) Characterization of European oak wood constitutes acting in the brown discoloration during kiln drying. Holzforschung 49 pp. 168–172

Dupleix A., Denaud L., Bléron L., Marchal R. (2013) The effect of log heating temperature on the peeling process and veneer quality: beech, birch, and spruce case studies. Eur. J. Wood Prod. 71 pp. 163 – 171.

Frihart C., Hunt C. (2010) Adhesives with Wood Materials - Bond Formation and Performance. Chapter 10. General Technical Report FPL–GTR–190. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_10.pdf

Kuljich et Cool. (2013) Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance. J Wood Sci Vol. 59 pp. 185 -194.

Jamalirad L., Doosthoseini K., Koch G., Ahmad Mirshokraie S., Hedjazi S. (2011) Physical and mechanical properties of plywood manufactured from treated red-heart beech (fagus orientalis l.) wood veneers. BioResources 6(4) pp. 3973-3986

Liu H., Shang J., Kamke F., Guo K. (2018) Bonding performance and mechanism of thermal‐hydro‐mechanical modified veneer. Wood Sci Technol 52 pp 343–363. https://doi.org/10.1007/s00226-017-0982-x

Memento FCBA (2018) http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/memento2018.pdf

Outahyon A. (2008) Influences de paramètres d'usinage et de stockage sur les propriétés fonctionnelles des surfaces de bois de douglas. ENSAM: https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004949

Pot G., Denaud L. E., and 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) pp. 247–316.

Rohumaa, A., Viguier, J., Girardon, S., Krebs, M., and 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, 1-9.

UIPC. 2018. Union des Industries du Panneau Contreplaqué (France). https://www.aimcc.org/union/union-des-industries-du-panneau-contreplaque-3/

Wilson J., Sakimoto E. (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood plywood production. Wood and Fiber Science, 37 Corrim Special Issue pp. 58 – 73.

Poster B19

Influence de l'anisotropie lors du fraisage de produits d'ingénierie bois

CURTI Rémi[1], GOLI Giacomo[1], MARCON Bertrand[2], COTTIN Fabrice[2], COLLET Robert[2], FURFERI Rocco[3]

[1]Università di Firenze, GESAAF, Via San Bonaventura, 13, 50145 FLORENCE, ITALIE
[2]Arts et Métiers, LaBoMaP (EA 3633) Rue Porte de Paris, 71250 CLUNY, FRANCE
[3]Università di Firenze, DIEF, Via Santa Marta, 3, 50139 FLORENCE, ITALIE
remi.curti@ensam.eu

Mots clefs : usinage ; fraisage ; anisotropie ; efforts de coupe

Contexte et objectifs

L'optimisation des paramètres d'usinage du bois massif et des produits dérivés de bois demeure très empirique. Cette optimisation est nécessaire dans le but d'améliorer la qualité des produits usinés tout en limitant le nombre et la durée des opérations ainsi que la consommation d'énergie liée au procédé. Basée sur une campagne expérimentale précédemment présentée par Goli (2017), nous proposons une nouvelle méthode de traitement des signaux d'efforts afin de déterminer les coefficients spécifiques de coupe pour différents matériaux en fonction de l'orientation des fibres les composant (lorsqu'elles sont présentent) par rapport à la direction de la vitesse de coupe de l'outil ; montrant ainsi l'importance de prendre en compte ces dernières dans les stratégies d'usinage et notamment dans les logiciels de fabrication assistée par ordinateur - FAO.

Matériel et méthodes

Des essais d'usinage ont été réalisés en contournant des éprouvettes cylindriques comme décrit par Goli (2016), cette procédure étant elle-même inspirées d'essais de coupe orthogonales antérieurs menés par Costes (2004). Ces essais ont été réalisés sur des matériaux homogènes isotropes (PTFE, MDF), anisotropes de type orthotropes hétérogènes (Peuplier, Douglas, et Hêtre massif) ou à plusieurs directions privilégiées (LVL de peuplier et de hêtre, CP de peuplier). Les efforts de coupes ont été relevés à l'aide d'un dynamomètre piezoélectrique Kistler 9255A.

Pour chaque produit testé, 3 à 4 engagements radiaux ont été utilisés, pour une profondeur de passe axiale correspondant systématiquement à l'épaisseur de l'échantillon usiné. Les essais de coupe ont été menés en opposition et en avalant à une vitesse d'avance de 2000 mm/min et une fréquence de rotation de broche de 3000 tr/min.

Le traitement des signaux a été réalisé sous Matlab. Les efforts de coupe mesurés (Fig. 1), selon les axes du plan ont été filtrés de façon optimale en utilisant une moyenne mobile d'une période correspondant à 25 tours d'outils (Fig. 2). Les signaux nettoyés ont permis de calculer l'effort résultant en fonction de la position de l'outil autour de l'échantillon (Fig. 3). Les trois figures (Fig. 1-3) présentent cette démarche pour du MDF usiné en opposition avec un engagement radial (r_e) de 1,5 mm.

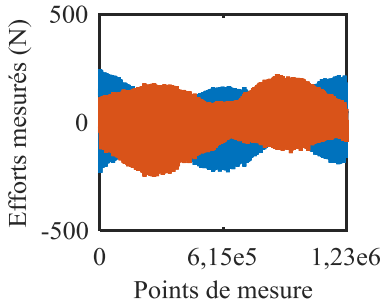


Fig. 1 : Signaux bruts relevés au cours de l'usinage du MDF

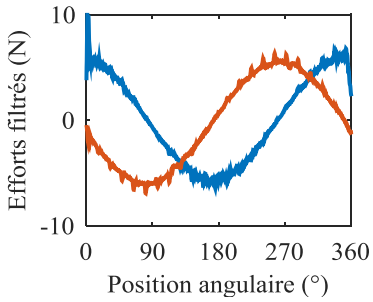


Fig. 2 : Signaux d'efforts de coupe du MDF filtrés

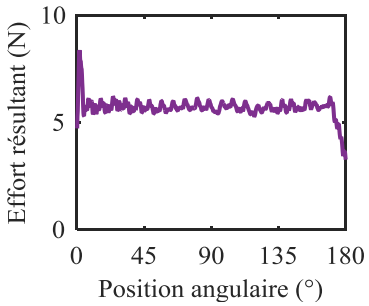


Fig. 3 : Résultante des efforts de coupe du MDF

Connaissant la géométrie de copeau produit, cet effort résultant est corrigé pour remonter aux efforts de coupes réels lors du passage des dents dans le matériau. Ces derniers sont enfin utilisés afin de déterminer le coefficient spécifique de coupe en fonction de l'angle de fil.

Résultats et discussions

Les signaux issus des matériaux homogènes et isotropes sont très similaires à ceux anticipés. Cette conclusion est moins évidente pour le bois massif et ses produits dérivés car ces échantillons n'étant pas droit de fil ni homogènes, l'outil de coupe voit localement un matériau différent (angle de fibre, densité local, etc.) de ce qui est attendu à l'échelle globale impactant ainsi l'effort résultant ainsi que le calcul des coefficients spécifiques de coupe (Fig. 4).

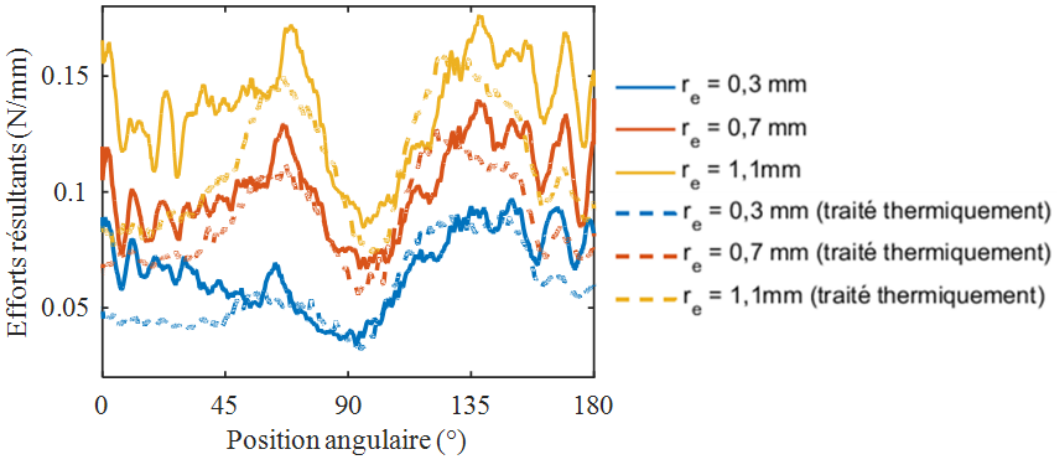


Fig. 4 : Evolution des efforts de coupe corrigés en fonction de l'angle du fil lors de l'usinage du peuplier massif pour plusieurs engaments radiaux r_e.

Les coefficients spécifiques de coupe ont été calculés en moyennant sur des plages de 10 ° les efforts et divisant ces moyennes par la section de copeau (épaisseur moyenne de copeau × engagement axial de la fraise). Des tables comportant 18 coefficients spécifiques de coupe ont ainsi été produites et, comme pour les efforts de coupes, ces derniers peuvent varier aisément du simple au quintuple selon l'angle du fil.

Conclusion et perspectives

La méthodologie éprouvée est satisfaisante, les tendances des efforts de coupes en fonction de l'angle du fil étant très cohérentes tout comme leur amplitude une fois corrigée, mais les essais doivent faire l'objet de plus de répétitions pour exprimer des coefficients spécifiques de

coupe robustes. De plus, nous souhaiterions réduire, ou mieux prendre en compte, les composantes « aléatoires » des signaux en intégrant l'hétérogénéité et l'anisotropie spécifique à chaque échantillon en mesurant localement leur densité et l'orientation du fil (cette dernière dans le cadre du bois massif uniquement).

Remerciements

Ces travaux ont été menés à bien grâce au support de la région Bourgogne Franche-Comté et à la plateforme technique Xylomat (ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST) ainsi que grâce à la prise en charge par l'ENSAM de Giacomo Goli comme professeur invité au LaBoMaP et au financement d'une STSM à Rémi CURTI par le COST FP1407 ModWoodLife. Les auteurs remercient également le support d'Antonio Scippa (UniFI) pour le traitement des signaux.

Références

Costes JP., Ko P., Ji T., Decès-Petit C., Altintas Y. (2004) Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process, Journal of Wood Science, Vol. 50, pp. 28-34

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, Vol. 74, pp. 867–874

Goli G., Curti R., Marcon B., Denaud L. (2017) Nouvelle méthode pour la détermination de l'usinabilité du bois et des paramètres de coupe optimaux en fonction de l'angle de fil, Actes des 6èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, pp. 86-87

Poster B20

Etude de la production de carrelets de menuiseries en LVL de chênes de qualité secondaire issus de la ressource locale

BESSEAU Benoît[1], BUTAUD Jean-Claude[1], COLLET Robert[1], LETOURNEAU Roger[1], MUZY Loïc[2], POT Guillaume[1]

[1] LaBoMaP, Arts & Métiers ParisTech, rue Porte de Paris, 71250 Cluny, France
[2] Pole développement et animation de territoire, 5 place du marché 71250 Cluny, France
benoit.besseau@ensam.eu

Mots clefs : ressource locale ; chêne ; menuiserie ; LVL ; déroulage

Contexte

La ressource bourguignonne en chênes de qualités secondaires est actuellement peu et mal valorisée, elle constitue pourtant un gisement considérable qui pourrait être mobilisé pour la construction. Une pré-étude (Collet *et al.* 2011) montre que le déroulage pour la production de carrelets LVL, destinés à la fabrication de menuiseries, représente une piste intéressante pour la valorisation des chênes de qualités secondaires, voire des bois de taillis (faibles diamètres et formes flexueuses). En effet, les techniques traditionnelles ne permettent pas d'utiliser cette ressource directement en bois d'œuvre. Cette pré-étude montre également la possibilité à moyen terme de susciter l'implantation locale d'unités industrielles.

Le LVL est un produit fabriqué à partir de feuilles de placages obtenues par déroulage. Le procédé consiste à réaliser des panneaux composés de plusieurs plis de placages disposés principalement voire en totalité dans le sens des fibres du bois, encollés et pressés. Cette technique permet d'obtenir un matériau plus homogène (répartition des nœuds dans la masse), avec une meilleure stabilité dimensionnelle, une résistance accrue et mieux maîtrisée. Des carrelets produits à partir de panneaux de LVL seraient adaptés au marché de la rénovation énergétique en permettant aux menuisiers, mieux qu'avec du bois massif, de fabriquer des menuiseries respectueuses des nouvelles normes en vigueur dans le bâtiment (RT 2012) et sur-mesure dans différentes épaisseurs de panneaux LVL, en délignant les largeurs de carrelets en fonction des besoins.

La Communauté de Communes du Clunisois (CCC) a réalisé une « Charte forestière », qui met en évidence que la ressource forestière du territoire est relativement peu exploitée et pourrait fournir jusqu'à 30.000 m^3 par an majoritairement en feuillus. Aussi, elle a souhaité étudier, en s'appuyant sur les compétences et les moyens du LaBoMaP de l'ENSAM de Cluny, l'opportunité de production de carrelets LVL de chênes dans le Clunisois, dans une perspective de développement économique local. L'objectif de ce projet est donc d'étudier le procédé de fabrication de carrelets LVL, constitués de placages déroulés issus de la ressource locale de chêne de qualités secondaires, pour la fabrication de menuiseries à hautes performances environnementales. Après une phase de définition du procédé, la qualité des placages et des carrelets et le rendement matière seront évalués pour répondre à cet objectif.

Matériels et méthodes

Ressource

Pour réaliser l'étude des paramètres de fabrication, la CCC a mis à disposition une trentaine de billons provenant de 6 arbres représentatifs de la ressource qu'elle souhaite valoriser (Fig.1 a,b). Ces arbres, abattus sur la commune de Salornay-sur-Guye (71), étaient destinés à une

utilisation en bois énergie. Les grumes ont été tronçonnées en billons de 90-95 cm de long en purgeant les plus gros défauts. Le « billonnage court » permet de supprimer les zones de défaut majeurs en les purgeant et en ne gardant que les zones de meilleure qualité, ce qui permet aussi d'optimiser l'utilisation de la matière première des bois flexueux lors de leur mise au rond (Fig. 1c et 1d).

Fig. 1a et 1b : Arbres abattus pour l'étude

Fig. 1c et 1d : comparaison billonnage long (2,5 m) et court (1 m) sur une même grume flexueuse

Fig. 1 : Intérêt du billonnage court pour des grumes flexueuses

Production de placages

Les billons ont été étuvés en l'état à une température de 65°C dans la bouilloteuse de l'ENSAM. Après une mise à longueur, ils ont été montés sur la dérouleuse expérimentale de l'ENSAM puis déroulés. Le ruban de placage obtenu a été massicoté en ligne afin d'obtenir des placages calibrés (Fig. 2). Les placages ont ensuite été séchés dans le séchoir de l'ENSAM.

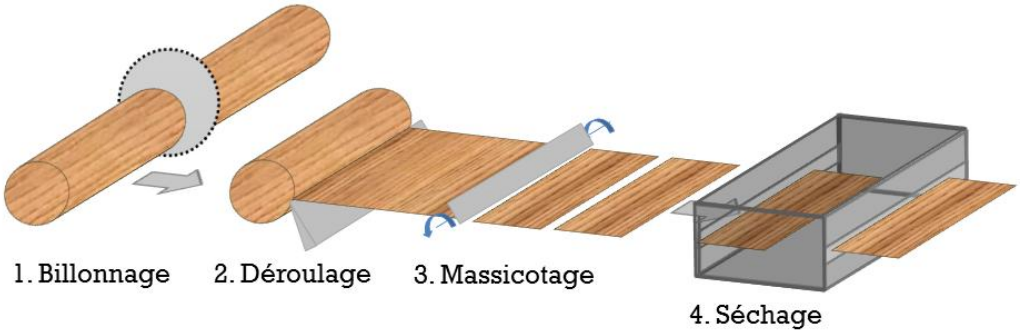


Fig. 2 : Procédé de production de placages

Tri des placages

Un tri des placages a été nécessaire. En effet, la purge des gros défauts lors du billonnage ne garantit pas l'obtention de placages de qualité suffisante : il reste quelques petits nœuds qui

peuvent s'avérer pénalisants pour la fabrication des carrelets et des défauts cachés dans le bois qui réapparaissent à mesure que le billon est déroulé. Ce tri a été fait dans le but d'obtenir des carrelets de menuiserie de qualité esthétique acceptable. Trois catégories de placages ont été établies (Fig. 3).

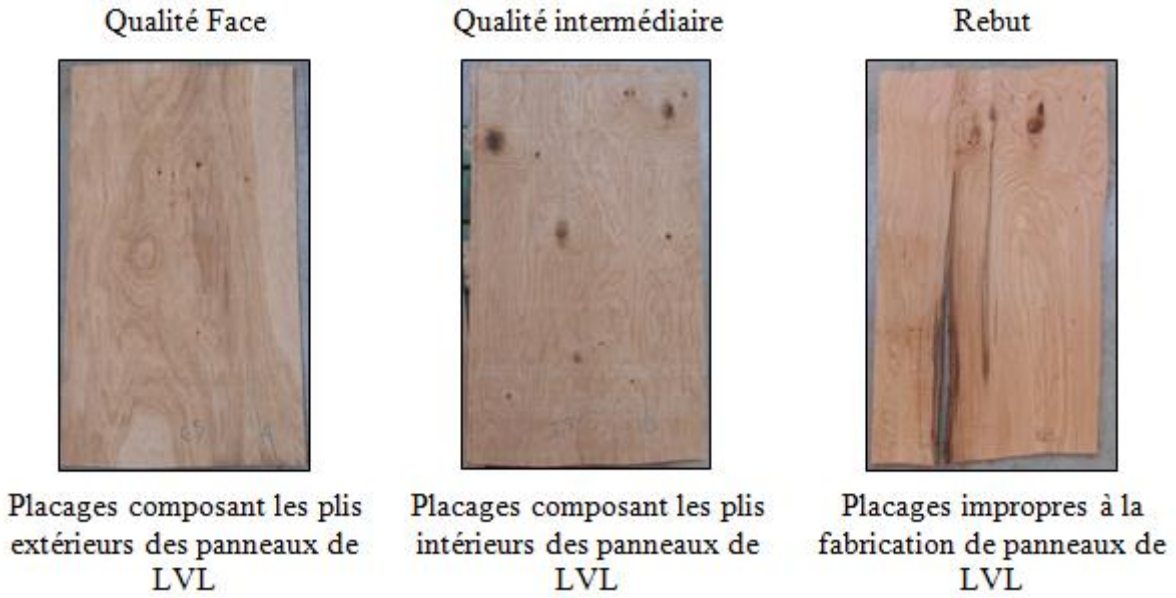


Fig. 3 : Classement des placages par qualité esthétique

Fabrication des carrelets

Les placages triés ont été assemblés par paquets identiques, encollés puis pressés pour fabriquer dans un premier temps des panneaux de LVL dans lesquels ont été délignés des carrelets courts. Ceux-ci ont ensuite été aboutés afin d'obtenir des carrelets de grande longueur. Le procédé d'aboutage tel qu'il a été exécuté est identique à ce qui est fait pour du bois massif et a été exécuté aux *Bois Profilés (Charolles)*.

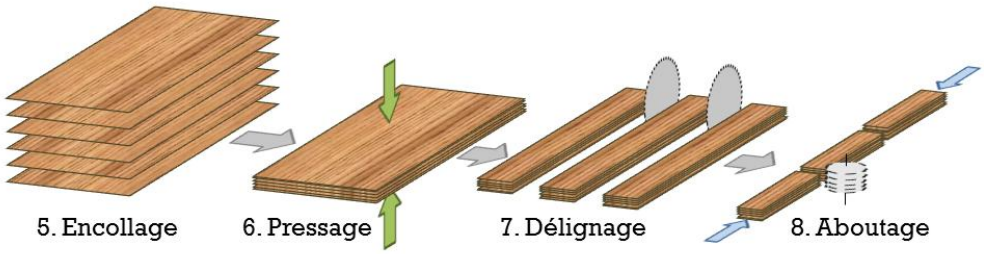


Fig. 4 : Procédé de fabrication des carrelets LVL

Résultats et discussion

Placages

Le chêne est une essence qui se déroule sans problème et le ruban de bois déroulé ne se rompt pas. Les placages obtenus sont fissurés (fissuration partielle des placages inhérente au procédé de déroulage avec une profondeur moyenne des fissures de l'ordre de 60% de l'épaisseur pour le cas du chêne) mais conservent une bonne résistance transversale, ce qui permet de les manipuler facilement sans les dégrader. Un système de mesure des fissures de déroulage (SMOF) développé par l'ENSAM a été utilisé pour cette partie de l'étude (Pałubicki, 2010).

Les placages déroulés en forte épaisseurs (4 mm) conservent une bonne qualité, ce qui est intéressant dans l'optique d'une production économique de carrelets de LVL.

Carrelets et prototype

La qualité esthétique des carrelets obtenus est bonne et confirme la possibilité de l'utilisation d'une partie de la ressource locale de chêne de qualité secondaire destinés jusqu'ici à des emplois en bois énergie. Ils ont permis la fabrication d'une fenêtre prototype dont les conditions de réalisation et la qualité finale ont été très bonnes. Le rendu esthétique est très proche de celui du bois massif.

Rendements matière

Dans le cadre de l'étude, une évaluation des différents rendements matière a été fait (Tab. 1). Le rendement de déroulage est d'environ 47 % et celui des placages gardés pour la fabrication des carrelets de menuiserie est de 78 %. Une bonne proportion des placages sont utilisables pour la fabrication de carrelets. Une partie des placages mis au rebut peuvent servir pour d'autres valorisations du LVL moins sévères sur l'aspect esthétique : panneau, structure…

Le rendement matière de la fabrication des carrelets, dans les conditions du laboratoire et avec les procédés de fabrication mis en œuvre, est d'environ 20 %. Une très grande partie de la matière écartée peut être valorisée dans la filière énergie. Ces différents rendements pourront être améliorés dans les conditions d'une unité de production locale.

Tab. 1 : Rendement matière du procédé

η déroulage	η placages	η panneau	η carrelets aboutés
47%	78%	74,77%	86,60%
$\eta_{\text{matière}}$ = 23,74%			

Conclusion et perspectives

L'utilisation du chêne de qualité secondaire pour la fabrication de carrelets de menuiserie en LVL se révèle être très intéressante du point de vue technique. Des billons actuellement destinés à alimenter la filière énergie peuvent être détournés pour la fabrication de produits à plus forte valeur ajoutée, tout en sachant que les pertes matière liées aux procédés de fabrication peuvent être réinjectées dans la filière énergie. Une étude plus axée sur la partie économique et stratégie d'implantation locale est actuellement en cours de discussion.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les acteurs qui ont participé à la bonne réalisation de cette étude : la Communauté de Communes du Clunisois pour le financement et la mise à disposition du bois, *les Bois Profilés* pour leurs conseils et la réalisation des aboutages, Vincent Benedetto de *Menuiserie Pontoise* pour la réalisation de la fenêtre, l'ONF pour la mise à disposition des bois, et enfin la région Bourgogne Franche-Comté.

Références

Collet R., Bléron L., Chastagnier T., Blot A., Liberge M. (2011) Etude en vue de la valorisation de la ressource bourguignonne en chênes de qualité secondaire dans de nouveaux usages constructifs. Contrat d'étude - APECF, 66 p.

Pałubicki, B. et al., 2010, A Method of Lathe Checks Measurement; SMOF device and its software. Eur. J. Wood and Wood Prod. 68, 151–159.

Poster B21

Etude expérimentale par corrélation d'images des propriétés de cisaillement de voile de panneaux de contreplaqués en hêtre

VIGUIER Joffrey [1], MARCON Bertrand [1], BUTAUD Jean-Claude [1], ROUX Benjamin [1], GIRARDON Stéphane [1], DENAUD Louis [1]

[1] LaBoMaP, rue Porte de Paris, 71250 Cluny
joffrey.viguier@ensam.eu

Mots clefs : hêtre ; contreplaqué ; corrélation d'images ; cisaillement

Contexte et objectifs

Cette étude est réalisée dans le cadre du laboratoire mixte public/privé BOurgogne PLacage Innovation (BOPLI) qui rassemble quatre partenaires : la région Bourgogne Franche-Comté, la société BRUGÈRE, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) de Cluny et AMVALOR, filiale de valorisation de la recherche de l'ENSAM. La société BRUGERE, et le LaBoMaP collaborent autour du déroulage, de la fabrication de placages et de panneaux à base de bois de hêtre. Deux axes de travail principaux ont été dégagés :

- L'amélioration de la qualité des placages et la maîtrise du processus de première transformation de hêtre
- La maîtrise du procédé de seconde transformation (fabrication de panneaux contreplaqués) et l'innovation produits

Les travaux en cours dans le deuxième axe de recherche portent sur la caractérisation mécanique de panneaux de contreplaqué issus de la production de BRUGERE. Cette caractérisation doit permettre à BRUGERE d'acquérir une meilleure connaissance des performances mécaniques de leurs produits. Le contreplaqué est souvent utilisé dans le secteur de la construction. En particulier, le contreplaqué peut être utilisé pour le contreventement de systèmes constructifs en ossature bois. Par conséquent, il est essentiel d'obtenir des propriétés de cisaillement de voile fiables pour le contreplaqué afin d'assurer la sécurité et la rentabilité de l'application des normes de construction. L'étude des déclarations de performances des fabricants de panneaux de contreplaqué d'Europe révèle que les fabricants utilisent des équivalences basées uniquement sur la masse volumique (CEN, 2011) pour fournir les propriétés de cisaillement de voile. Ces équivalences sont très pénalisantes et ne reflètent pas les excellentes propriétés mécaniques des panneaux de contreplaqué à base de hêtre. La cause de ce « manquement » repose sur le fait que les essais préconisés par le cadre normatif relatif à la détermination du cisaillement de voile des panneaux (CEN, 2005) sont très contraignants. En effet, ils nécessitent un dispositif lourd à mettre en place, et l'emploi de machines d'essais de grandes dimensions en raison de l'encombrement de l'éprouvette.

L'objectif de cette étude est de proposer un essai plus simple à réaliser que celui prescrit en réduisant l'encombrement nécessaire et en se passant de dispositif de maintien de l'éprouvette, tout en préservant l'entière validité des propriétés mesurées. De plus, il est proposé d'utiliser la corrélation d'images comme moyen de mesure de déplacement pour éviter la mise en place de capteurs de déplacement, source d'erreur dans le cas de ces essais. La première partie de cette étude présente la stratégie proposée pour réaliser l'essai et la seconde les résultats et avantages de la méthode présentée.

Matériels et méthodes

L'essai normatif est décrit sur la partie gauche de la Fig. 1, la forme de l'éprouvette est complexe et sa réalisation rend l'utilisation d'une défonceuse à commande numérique quasiment obligatoire. De plus pour éviter le flambement de l'éprouvette lors de sa sollicitation, deux montants doivent être collés de part et d'autres de l'éprouvette. L'éprouvette est de plus disposée verticalement et l'application des efforts implique d'utiliser un dispositif venant s'opposer au basculement de l'éprouvette (composante horizontale de la résultante).

L'idée générale de la simplification proposée repose sur la rotation de l'éprouvette afin de réduire au minimum la composante horizontale de la résultante. La géométrie de l'éprouvette ainsi que le collage des montants empêchant le flambement sont néanmoins conservés. De cette manière le dispositif anti basculement n'est plus nécessaire et l'encombrement est réduit.

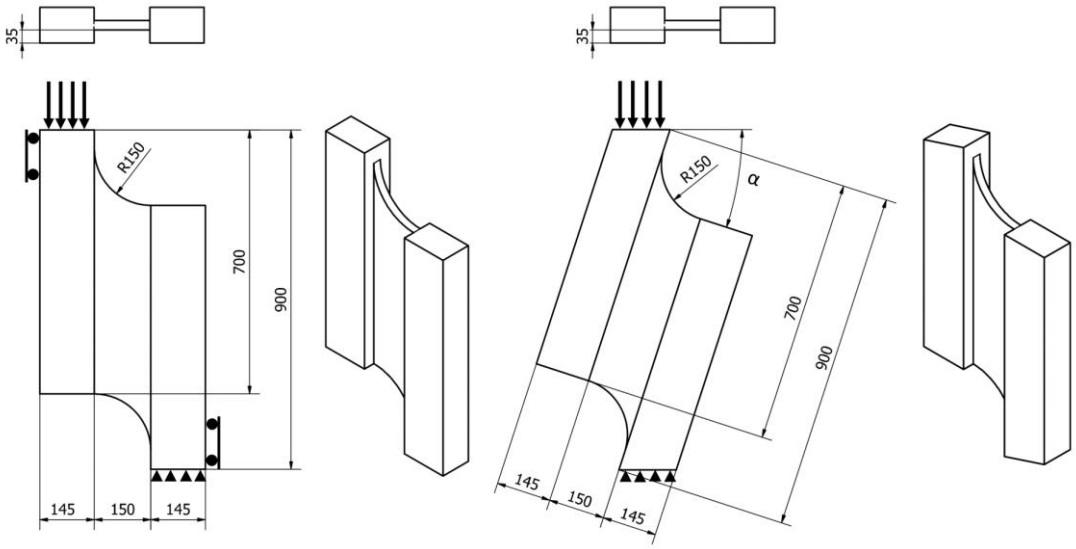


Fig. 1 : A gauche : essai normalisé (EN 789) et à droite essai proposé

Afin de déterminer l'angle de rotation choisi de l'éprouvette, un modèle éléments finis a été développé. Ce modèle utilise des éléments coques quadratique à 6 nœuds (COQ6 du logiciel Cast3m) avec des propriétés mécaniques orthotropes. Les propriétés mécaniques utilisées sont présentés dans le Tab. 1. L'orientation des fibres est alternativement 0° et 90° pour simuler le comportement mécanique d'un panneau de contreplaqué. Les conditions limites sont décrites sur la partie droite de la Fig. 1. L'angle de rotation de l'éprouvette varie entre 0° et 25° et le nombre de plis entre 3 et 15. Les composantes horizontales et verticales (dans le repère de l'éprouvette) sont ensuite calculées. Enfin, il s'agit de trouver l'angle de rotation de l'éprouvette nécessaire pour que l'angle formé par la résultante soit égal à 0° (totalement verticale par rapport au repère de l'éprouvette).

Tab. 1 : Propriétés élastiques utilisées dans le modèle éléments finis

Propriété	Plis en hêtre (Guitard, 1987)	Montant en douglas (Bergman, 2010)
Ex (MPa)	13 900	14 740
Ey (MPa)	1 900	737
Nuxy	0.24	0.45
Gxy (MPa)	860	1 150
Gyz (MPa)	490	103
Gxz (MPa)	1 280	943

Les essais mécaniques permettant de valider la démarche ont ensuite été réalisés pour l'angle dont la résultante horizontale est égale à 0. Au total, 18 panneaux de contreplaqués différents ont été utilisés dans cette étude. Deux épaisseurs différentes ont été étudiées (18 et 25 mm). Pour chaque panneau et conformément à l'EN 789 (CEN, 2005), deux éprouvettes de cisaillement ont été extraites, l'une dont les fibres sur les faces sont orientées parallèlement à la direction d'application des efforts et l'autre perpendiculairement. Quatre montants en douglas d'une épaisseur de 35 mm ont ensuite été collés à chaque éprouvette. La campagne d'essais porte donc sur un total de 36 éprouvettes. De plus il a été choisi d'utiliser la corrélation d'images comme moyen de mesure des déplacements, cette méthode permettra de contrôler si les champs de déplacements correspondent bien à la sollicitation voulue. Deux caméras sont disposées de part et d'autre de l'éprouvette ce qui permet de vérifier cet aspect des deux côtés.

Résultats et discussions

Le résultat de la modélisation éléments finis est présenté sur la Fig. 2. L'angle formé par la résultante des efforts passe d'environ -20° à +15° lorsque l'angle de rotation de l'éprouvette passe de 0° à 25°. Il apparaît aussi que les valeurs d'angle formé par la résultante sont sensibles au nombre de plis des panneaux de contreplaqué. Dans le cas des panneaux de 18 mm et 25 mm d'épaisseur (proche des cas 9 et 11 plis de la simulation), l'angle de rotation de l'éprouvette doit être d'environ 18° pour que l'angle formé par la résultante soit égal à 0°. C'est cette valeur d'angle qui a été choisie pour la fabrication des éprouvettes et la réalisation des essais.

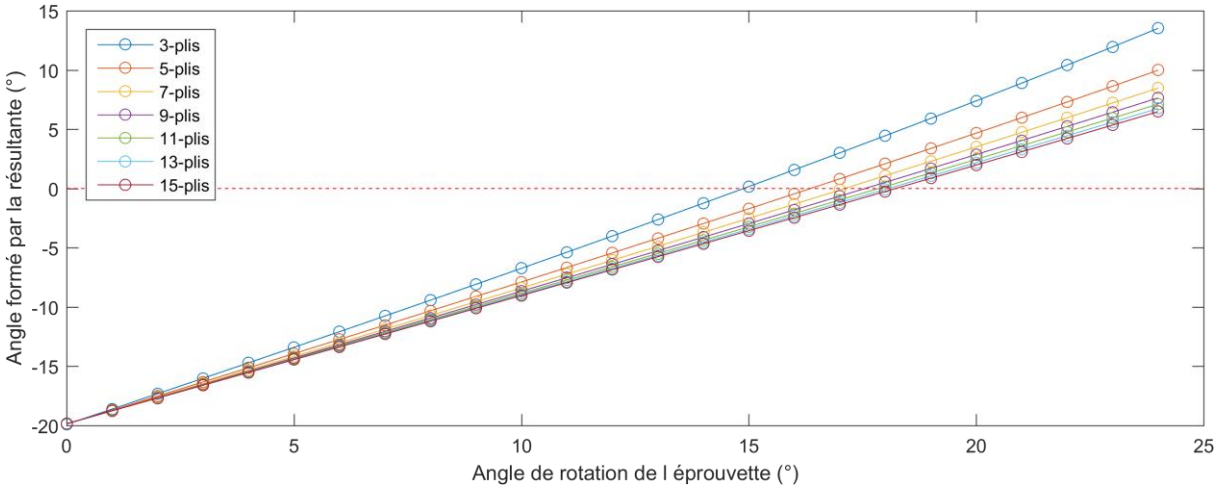


Fig. 2 : Résultat de la modélisation éléments finis

La Fig. 3 montre les champs de déplacement dans la direction de la longueur de l'éprouvette obtenus lors de l'essai de cisaillement pour les deux faces de deux éprouvettes. Les courbes « effort-déplacement » (obtenues par suivi du déplacement de deux points particuliers) des deux essais sont aussi présentées. Il peut être observé que lors du premier essai (à gauche) la sollicitation semble identique sur les deux faces. Cela se traduit par des courbes très proches indépendamment de la face observée. Au contraire, sur le deuxième essai, il apparaît que la sollicitation n'est pas celle escomptée, ce qui montre l'intérêt de l'utilisation de corrélation d'images en substitution de capteurs de déplacements traditionnels.

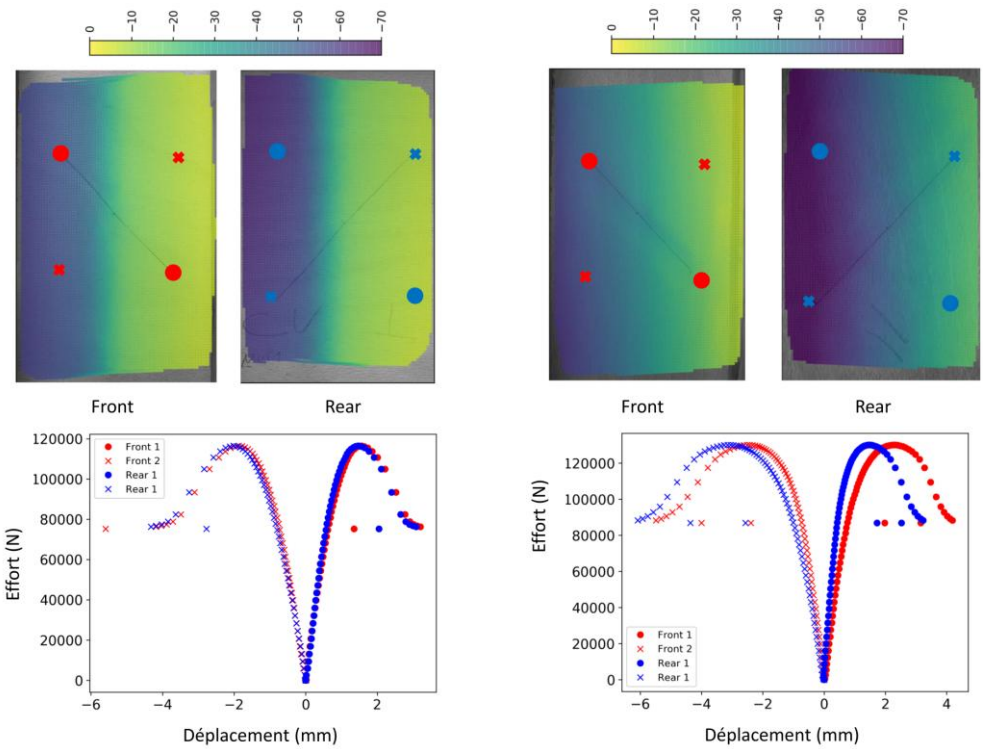


Fig 3. : Champs de déplacements verticaux obtenus lors de l'essai de cisaillement. Les courbes de déplacement représentent les déplacements relatifs entre les deux points considérés.

Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de montrer qu'il était possible de réaliser des essais de caractérisation de cisaillement de voile respectant les objectifs normatifs mais dans une configuration plus fonctionnelle. De plus l'utilisation de la corrélation d'images montre les limites de l'utilisation de capteurs de déplacement traditionnels et le risque lié à l'application simple des essais normatifs.

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre du laboratoire mixte public-privé BOPLI cofinancé par la société BRUGERE, la région Bourgogne Franche-Comté et l'ENSAM. Ces travaux ont été menés à bien grâce à la Plateforme Technique Xylomat subventionnée par l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST.

Références

Bergman R. *et al.* (2010), "Wood handbook: Wood as an engineering material," For. Prod. Lab.

CEN (2011), EN 12369-2 Wood-based panels - Characteristic values for structural design - Part 2: Plywood.

CEN (2005), EN 789 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels.

Guitard D. (1987), Mécanique du matériau bois et composites, CEPADUES.

Poster B22

Optimisation du temps de chauffe de billons en vue de leur déroulage

FRAYSSINHES Rémy[1], GIRARDON Stéphane[1], COLLET Robert[1], DENAUD Louis[1], COTTIN Fabrice[1]

[1] LaBoMaP, Arts et Métiers, Rue Porte de Paris 71250 CLUNY
remy.frayssinhes@ensam.eu

Mots clefs : Diffusivité thermique ; Déroulage ; Bois ; Humidité

Contexte et objectif

Le déroulage du bois se distingue des procédés d'usinage courants puisque le produit est le copeau. La qualité du placage dépend de la nature du bois et des paramètres du procédé (température du billon, réglages de la machine, affûtage des outils, …). L'étuvage des billons est une étape souvent nécessaire pour obtenir un placage de bonne qualité (état de surface, fissuration, …). Elle consiste à chauffer le bois jusqu'à des valeurs cibles permettant de fabriquer un copeau en limitant son endommagement. La température doit être élevée (env. 80°C) pour les bois denses et faible (env. 20°C) pour les bois de faible densité. L'objectif de cette étude est de déterminer le temps d'étuvage optimal afin que la température cible soit atteinte au cœur du billon. Cette optimisation permet aussi d'abaisser les coûts du processus d'étuvage pour les industriels du déroulage.

Matériel et méthode

Le déroulage de placages de bonne qualité impose que l'humidité du bois soit bien au-dessus du point de saturation des fibres (PSF), correspondant à l'état vert du bois. La modélisation du comportement thermique du matériau bois a été abordée dans la littérature par différents auteurs (MacLean 1941; MacLean 1946; Maku 1954; Kollmann et Malmquist 1956; Côté et Kollmann 1968) mais aucun ne présente de modèle avec de l'eau libre contenue dans les lumens des cellules ce qui le cas dans la majorité des cas réels de chauffe. Gu et Hunt (2004) proposent un modèle par la méthode des éléments finis qui permet de déterminer la mécanique de transfert de chaleur.

Les modèles de Maku (1954) et Kollman (1956, 1968) ont été adaptés en ajoutant de l'eau libre dans les lumens des cellules afin de déterminer la diffusivité équivalente du matériau bois à une humidité donnée (au-dessus du PSF). 22 billons de douglas de diamètres et longueurs différents ont été chauffés à différentes températures. Les billons ont été instrumentés afin de suivre l'élévation de température au court du temps. La diffusivité de chaque billon a été déterminée par calage des courbes expérimentales avec le modèle analytique simplifié.

Kollman (1956, 1968) part du principe que le bois peut être considéré comme un assemblage de couches de parois cellulaires et d'air. Notre approche consiste à ajouter une couche d'eau libre au complexe paroi cellulaire et air. La figure 1 (image de (Wheeler 2017)) représente les modes principaux de transmission de chaleur, le cas (a) concerne la conductivité dans le sens parallèle aux trachéides ou aux rayons ligneux et le cas (b) représente la conductivité dans le sens transversal aux trachéides.

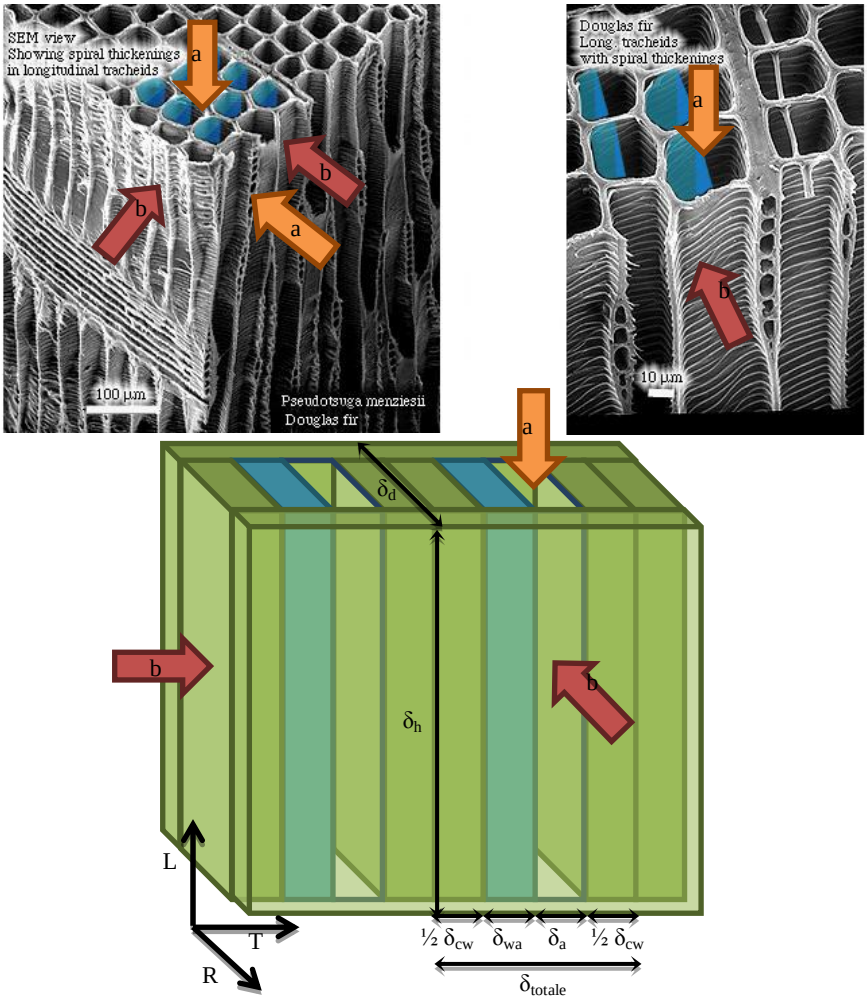


Fig. 1 : Modélisation thermique du bois

Dans cette étude, les billons de douglas ont un diamètre compris entre 350 et 500mm et une longueur comprise entre 650 et 800mm. Ils ont été chauffés dans une étuve à eau chaude régulée en température. La mesure et l'acquisition de l'élévation de la température a été réalisée grâce à des thermocouples de type K, d'une carte d'acquisition Agilent 34970A et d'un logiciel d'acquisition développé en interne (Roux 2018) pour cette application. Tous les billons ont été percés dans la moelle avec un foret Dormer 5x400mm afin de placer le thermocouple au centre de chaque billon. La figure 2 représente la position du thermocouple au cœur du billon.

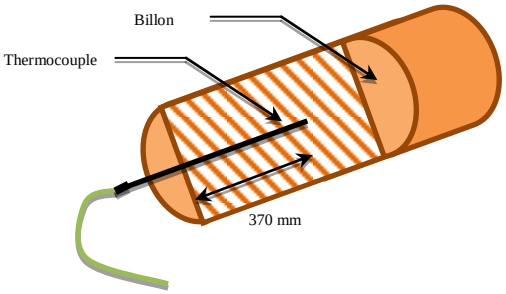


Fig. 2 : Schéma d'un billon instrumenté

La température au cœur d'un cylindre peut être déterminée grâce à l'équation de la chaleur (Jannot et Moyne 2016) dans le sens radial et longitudinal.

Elle est approximée dans le sens radial par la formule :

$$T_{(r,t)} = T_{fin} + \frac{2(T_{ini} - T_{fin})}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\omega_n \cdot r)}{\omega_n \cdot J_1(\omega_n \cdot R)} e^{-a_r \cdot \omega_n^2 \cdot t}$$

La température est approximée dans le sens longitudinal par la formule :

$$T_{(x,t)} = T_{fin} + \frac{4(T_{ini} - T_{fin})}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left((2n+1)\frac{\pi}{2}\frac{x}{L}\right) \cdot e^{-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{a_l \cdot t}{L^2}}$$

La température au cœur du billon et une combinaison de ces deux températures (théorème Von Neumann) :

$$\left[\frac{T_{(x,r,t)} - T_{fin}}{T_{ini} - T_{fin}}\right] = \left[\frac{T_{(x,t)} - T_{fin}}{T_{ini} - T_{fin}}\right] \times \left[\frac{T_{(r,t)} - T_{fin}}{T_{ini} - T_{fin}}\right]$$

avec T_{fin} la température de l'eau ; T_{ini} la température initiale du billon ; R le rayon du billon ; J_0 et J_1les fonctions de Bessel ; ω_n les racines de la fonction de Bessel J_0 diviser par le rayon ; $a_r$et a_l les diffusivités du billon respectivement radiale et tangentielle, r la position radiale de mesure et t le temps.

Résultats et discussion

En se basant sur le modèle de diffusivité développé (modèle dérivé de celui de Kollman), il est possible de déterminer la diffusivité radiale du billon en fonction de son humidité et de sa masse volumique (cf. figure 4). Augmenter l'humidité a tendance à diminuer la diffusivité jusqu'à atteindre un minima (≈30% de volume d'air par rapport au volume total d'une cellule), puis cette dernière augmente jusqu'à ce que les lumens soient saturés en eau libre.

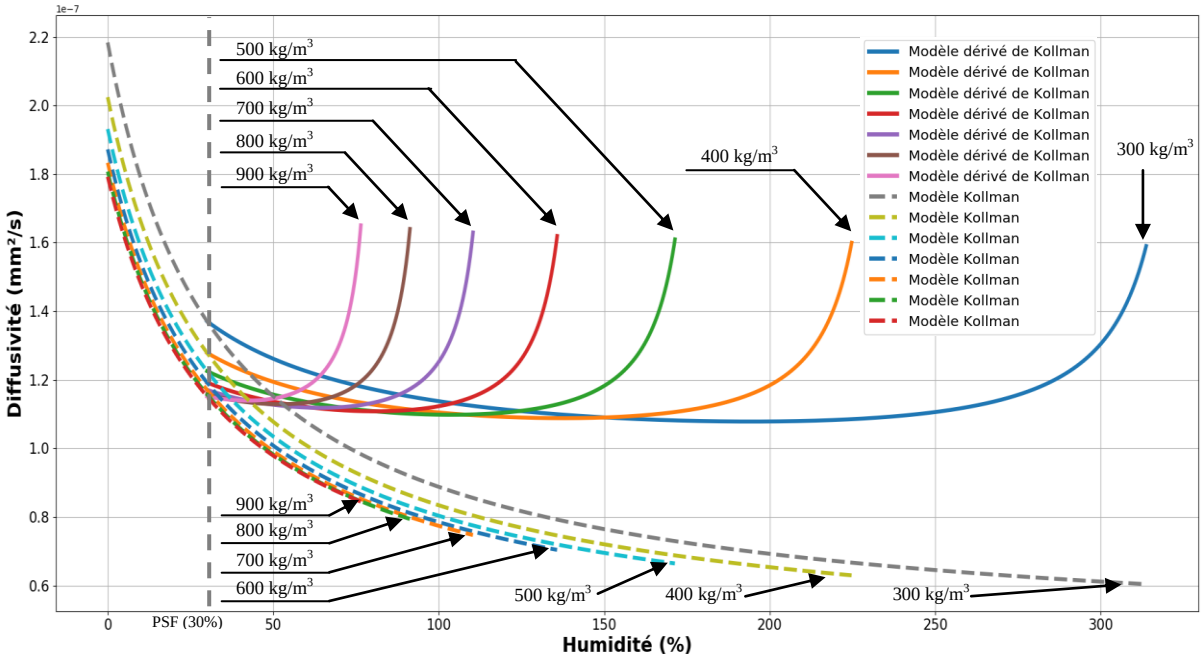


Fig. 4 : Diffusivité radiale en fonction de l'humidité et de la masse volumique

Conclusion et perspective

Le modèle est actuellement en cours de validation. Une campagne expérimentale a permis de déterminer les diffusivités de chaque billon à partir des mesures de l'évolution de la température et d'un modèle analytique simplifié. La figure 5 montre la moyenne de la diffusivité radiale pour les billons de douglas. La moyenne de la diffusivité est égale à 577 mm²/s.

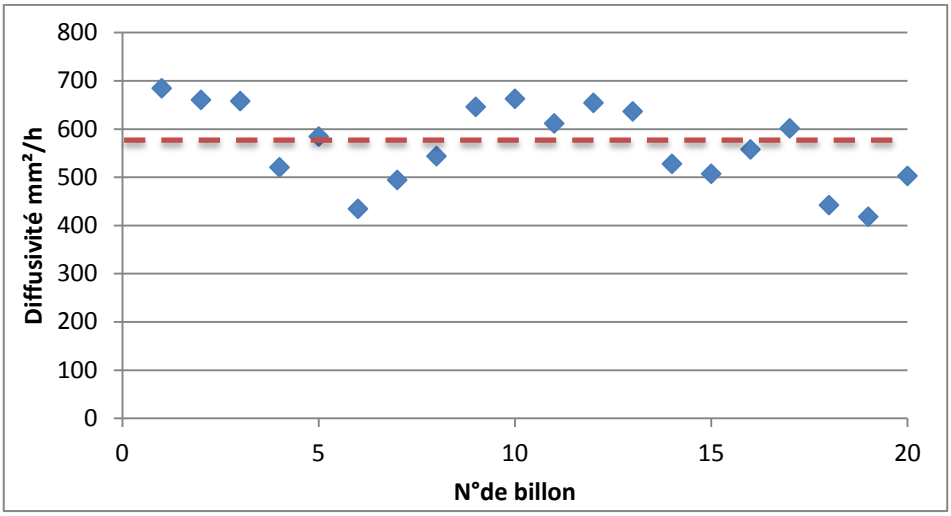


Fig. 4 : Diffusivité des billons de douglas relevé

La diffusivité peut être évaluée via le modèle développé ce qui permet de déduire la durée de chauffe pour atteindre une température cible au cœur billon. Cette durée pourra donc être optimisée en l'adaptant en fonction de la production industrielle (diamètre maximum, humidité moyenne, essence, …) une fois que le modèle aura été validé sur d'autres modalités.

Références

Côté W., Kollmann F. (1968) « Principles of wood science and technology », vol. 1. Berlin: Springer-Verlag.

Gu H., John F. H. (2004) « Two dimensional finite element heat transfer models for softwood », In Proceedings: 7th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium: Nanjing, China, October 31–November 2, 2004: Volume 1.[Sl]: Science & Technique Literature Press: Pages 344-354.

Jannot Y., Moyne C. (2016) « Transferts thermiques: cours et 55 exercices corrigés ».

Kollmann F., Malmquist L. (1956) « Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen », Holz als Roh-und Werkstoff 14 (6): 201–204.

MacLean J. D. (1941) « Thermal conductivity of wood », ASHVE Iransactions 47: 323.

MacLean J. D. (1946) « Rate of temperature change in short-length round timbers », US Department of Agriculture, Forest Service.

Maku T. (1954), « Studies on the Heat Conduction in Wood ».

Roux B. (2018), « Agilent Temperature Recorder », AMVALOR.

Wheeler E. (2015). « Softwood Anatomy and Properties».

Session Poster C

C01 : Vers la qualification in-situ de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive, Hafsa Waël 191

C02 : Optimisation Numérique de la Détermination de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques, Pham Minh Dung et al. 196

C03 : Effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de propagation des ondes ultrasonores, Zhang Xi 199

C04 : Conception de mousses de tannins à hydrophobie modulée, Chapuis Hubert 203

C05 : Influence de la pollution sur les propriétés du bois de la mangrove jouant un rôle de phytorémédion: Cas pratiques de Rhizophora racemosa et Avicennia nitida, Mabicka Iwangou Saint Bickolard 205

C06 : Caractérisations chimiques et activités antitermites des fractions volatiles (huile essentielle et résine brute) et lourde (résine purifiée) de Canarium schweinfurthii (Aiélé) du Gabon., Bédounguindzi Walter Fiacre 209

C07 : Criblage phytochimique, activité antifongique des composés extractibles du noisetier du Gabon vis-à-vis des champignons basidiomycètes Poria placenta, Coniophora puteana, Gloephylum trabeum, Bopenga Bopenga Christ Stone Arnaud 213

C08 : Identification of phenolic compounds in Prosopis juliflora by liquid chromatography - electrospray ionization mass spectrometry, Chepkwony Sarah et al. 216

C09 : Valorisation des pentoses issus du hêtre : nouveaux composés amphiphiles tensio-actifs et/ou gélifiants à base de xylose, Verove Clémentine et al. 219

C10 : Gélifiants trimodulaires biosourcés : synthèse et caractérisations, Zang Ondo Cherryl Mirabelle et al. 221

C11 : Analyse dendrochronologique des carottes d'épicéas modernes de la collection de J.-L. Giddings : apports pour la datation et la dendro-provenance des bois archéologiques alaskiens, Taieb Juliette et al. 223

C12 : Analyse numérique du comportement thermique de poutres hybrides bois-acier en situation d'incendie, Béreyziat Antoine et al. 227

C13 : Sur la fissuration du bois vert par modélisation numérique et microtomographie à rayons X, Mambili Lebongui Germice Jordy et al. 231

C14 : Etude comparative du comportement hydromécanique en compression cyclique de trois essences tropicales, Engonga Edzang Arnauld Clauvy's et al. . 234

C15 : Caractérisation mécanique in situ de quelques essences tropicales pour la réalisation de poutres en BMR., Bidzo Cédric Horphe 237

C16 : Conception et fabrication d'une brique adobe à base de l'argile et de la sciure de bois, Oum Joseph Bertrand et al. 240

C17 : Mise en evidence de l'impact des variations climatiques sur la durée de vie d'une structure en bois:étude expérimentale, Asseko Ella Martian et al. 243

C18 : Mechanical properties of "flexure wood", Niez Benjamin et al. 247

C19 : Mona Lisa's digital twin: identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modeling, Riparbelli Lorenzo 250

Poster C01

Vers la qualification *in-situ* de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive

HAFSA Wael[1], ANGELLIER Nicolas[1], TAKARLI Mokhfi[1], POP Ion Octavian[1]

[1] Univ. Limoges, GC2D, EA 3178, F-19300 Egletons, France
wael.hafsa@unilim.fr

Mots clefs : CSI, CND ; méthode inverse ; résistivité électrique ; teneur en eau

Introduction

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 résistive de la qualification de la teneur en eau de ces structures. Simple d'utilisation et relativement peu coûteuse, elle présente toutefois quelques verrous liés à la possibilité de réaliser un contrôle de santé intégré CSI (ou SHM en anglais pour Structural Health Monitoring). De plus, Vermaas et al. (1975) ont constaté que 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 courant continu. En effet, des essais préliminaires montrent des difficultés liées aux hautes résistivités, aux grandes lignes de courant et aux problèmes de contact entre ces 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 des éprouvettes de Douglas (Nguyen 2014).

Optimisation expérimentale

Etude bibliographique statistique

Aujourd'hui plusieurs études pour caractériser l'état hydrique de structures en bois peuvent être référencées. La Fig. 1 montre une synthèse de 67 références qui ont traité la problématique de la mesure de la résistance électrique en fonction de la teneur en eau.

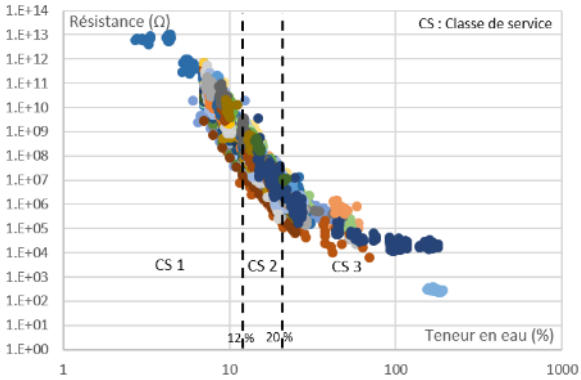


Fig. 1. Etude bibliographique

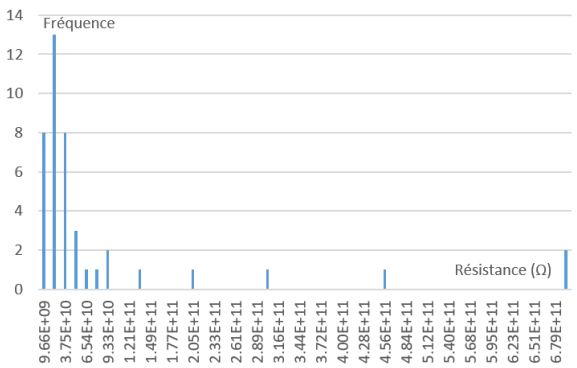


Fig. 2. Etude statistique pour w=7%

Ces données classées selon l'essence, le type (résineux ou feuillu), l'origine géographique, la direction (L, R ou T) et la température montrent bien qu'en-dessous du point saturation des fibres (environ 30%), une relation log-linéaire existe entre la résistance et la teneur en eau. Les études montrent aussi qu'en-dessous de 12% la mesure de la résistivité devient problématique. La Fig. 2 présente une première étude statistique des données de résistance de différentes essences de bois, et ce, pour une teneur en eau égale à 7%. D'après cette étude, 70% des valeurs de résistance se trouvent dans la plage de résistance [2.7e+09 Ω, 4.5e+10 Ω [. Cette base de données bibliographique a été mise en place afin de calibrer les mesures expérimentales.

Tri de données post-inversion

Comme il a été rappelé dans l'introduction, des essais sur des éprouvettes de Douglas conditionnées à une teneur en eau d'environ 18% ont été réalisés. Les éprouvettes sont instrumentées par 21 électrodes permettant de mesurer les résistivités (D) à différents niveaux. Afin de déterminer les valeurs de résistivité associées aux mesures obtenues, nous avons eu recours à approche numérique proposée par Nguyen (Nguyen 2014 ; Hafsa et al., 2018 ; Pham et al., 2018). Cette méthode inverse est basée sur la minimisation des écarts entre les mesures expérimentales (D_{mes}) et les calculs par méthode numérique des rapports entre la différence de potentiel (DDP) entre une paire d'électrodes et le courant injecté par une autre paire (D_{num}). La Fig. 3 décrit un exemple des résultats numériques qui présente une erreur significative d'inversion par rapport aux données expérimentales. Le Tab. 1 résume les autres résultats pour 3 profondeurs de mesure et 3 valeurs d'écartement entre les électrodes (a=1.5 ; 3 et 4.5 cm). Un problème d'identification de cinq quadripôles ayant en commun les deux électrodes 17 et 20 peut être observé. Nous constatons aussi que les quadripôles concernés se positionnent à proximité de la face humide de l'échantillon, ce qui peut également induire des effets de bord.

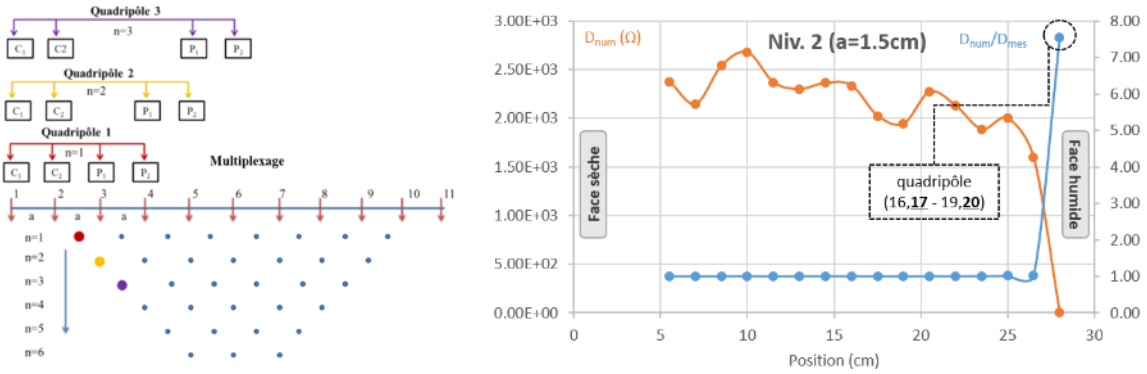


Fig. 3. Identification d'un quadripôle après inversion

Tab. 1 : Desriptif des quadripoles identifiés

Quadripôles	Dipôles d'injection de courant	Dipôles de mesure de la DDP	Ecartement a (cm)	Niveau n	$e = D_{num}/D_{mes}$
1	16 ; **17**	19 ; **20**	1.5	2	7.53
2	15 ; **17**	18 ; **20**	3	1	1.51
3	13 ; 16	**17** ; **20**	4.5	1	1.86
4	12 ; 15	**17** ; **20**	4.5	2	1.48
5	11 ; 14	**17** ; **20**	4.5	3	1.16

Cependant, un tri de données expérimentales est nécessaire afin d'améliorer la qualité d'inversion de données expérimentales réelles. Par conséquent, le tri de données effectué réduit le nombre de quadripôles de 227 à 222. La Fig. 4 montre les résultats obtenus après le tri sur l'ensemble des quadripôles.

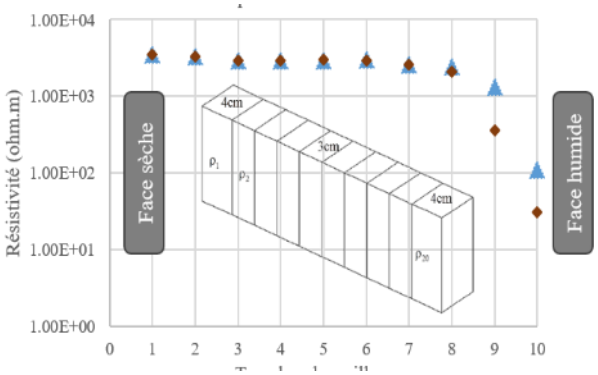


Fig. 4. Résultats d'inversion (avant et après le tri de données)

Il est à noter qu'après le tri, la moyenne de l'indicateur quantitatif d'erreur d'inversion (D_{num}/D_{mes}) est passé de 1.05 à 1.02, avec un écart type de 0.438 à 0.033. Par conséquent, la résistivité moyenne obtenue après inversion est supérieure à celle avant le tri.

Stratégie expérimentale pour les électrodes

Dans le cas du monitoring *in-situ* à long terme, deux problématiques sont à résoudre : l'entrée de l'eau dans les interstices capillaires tout au long de l'électrode, et la diminution de la pression de contact entre le bois et l'électrode entrainant le desserrage de cette dernière (Kosch et al. 2016), (Brischke et al. 2007). En effet, les électrodes ne maintiennent pas le contact électrique en raison du phénomène de retrait-gonflement du bois et de l'incapacité du métal à produire une adhérence mécanique durable avec les cellules du bois. Par conséquent, les électrodes à base de vis en acier inoxydable ont été choisies grâce à leur simple manipulation et à la disponibilité des différentes longueurs. Afin de remédier à ces problématiques nous proposons un couplage des solutions proposées par (Kosch et al. 2016), (Brischke et al. 2007) (Fig. 5).

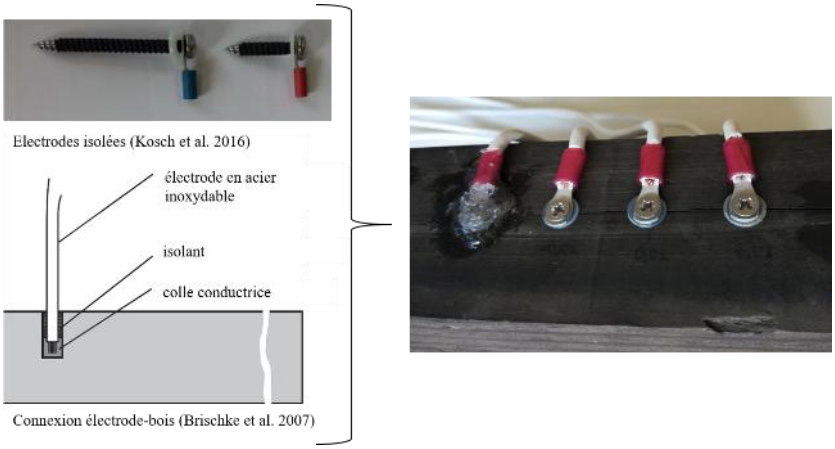


Fig. 5. Nouvelle stratégie expérimentale pour les électrodes

En effet, l'absorption d'eau capillaire peut être évitée à l'aide un joint d'étanchéité et en collant la partie supérieure de l'électrode. Pour assurer la profondeur d'investigation requise, le corps de l'électrode est isolé à son tour par une gaine thermo-rétractable. Une connexion

durable et conductrice entre la tête de mesure et le matériau est assurée grâce à une colle conductrice caractérisée par une résistivité inférieure à 0.01 Ω.m.

Par ailleurs, pour des applications expérimentales in-situ, la solution présentée en Fig. 6 est proposée. Cette solution suppose l'utilisation des organes des assemblages comme électrodes de mesure.

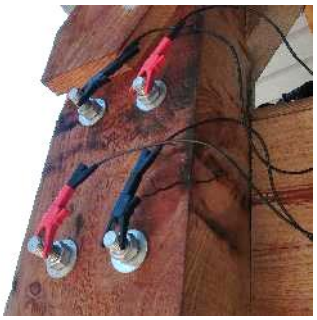


Fig. 6 : Des électrodes à base d'éléments d'assemblage

Conclusion et perspectives

Les approches expérimentale et numérique représentent une voie encourageante pour l'évaluation des champs de résistivité corrélés à une répartition spatiale d'eau liée dans les matériaux hygroscopiques. L'objectif de ces travaux consiste à calibrer l'outil de mesure sur des matériaux hygroscopiques, en particulier le bois. A plus long terme des protocoles expérimentaux seront développés afin de promouvoir un outil de diagnostic et/ou de surveillance des ouvrages en service dans des environnements climatiques variables. Nous pensons, comme développement potentiel, au monitoring des ouvrages d'art en bois. Également, le verrou induit par de longues lignes de courant dans un matériau sec peu conducteur devra être levé en développant les relais bibliographiques et les relais numériques (modèles par éléments ou différences finies par exemple) pour aboutir, à terme, à des cartographies robustes d'hygrométries dans des éléments massifs.

Références

Brischke, C., et al. (2007). Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. Building and Environment, 43(10), 1566-1574.

Hafsa, W., et al. (Juin 2018). Evaluation de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques : vers le Monitoring et le Diagnostic Hydrique des Structures. 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Saint Etienne.

Koch, J., et al. (2016, August). Monitoring of moisture content of protected timber bridges. In World Conference on Timber Engineering (p. 8).

Nguyen, T. A. (2014). Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois (Doctoral dissertation, Limoges).

Pham, M. D., Nguyen, T. A., Hafsa, W., et al. (2018, May). Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in sructural timber. In ternational conference on Collaboration in Research and Education for Sustainable Transport development (CoREST), Vietnam.

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.

Poster C02

Optimisation numerique de la determination de champs de resistivite electrique de materiaux hygroscopiques

PHAM Minh Dung[1,2], ULMET Laurent[1], NGUYEN Tuan Anh[3], ANGELLIER Nicolas[1], DUBOIS Frédéric[1]

[1]Laboratoire GC2D – Université de Limoges
[2]Ecole Supérieure de Génie Civil de MienTrung
[3]Ecole Supérieure de Transport de Hô Chi Minh - Ville
minh-dung.pham@etu.unilim.fr ; phamminhdung@muce.edu.vn

Mots clefs : bois ; calcul numérique ; matériaux hygroscopiques ; méthode inverse ; résistivité ; terre crue

Introduction

Les matériaux de construction hygroscopiques (bois, terre crue, …) voient leurs propriétés physiques et mécaniques fortement influencées par leur teneur en eau. La diffusion d'humidité en surface et au cœur varie dans les éléments massifs (poutre bois, éléments de maçonneries en terre crue) impliquant la nécessité de connaître le profil d'humidité pour estimer le comportement à long terme et la durabilité des structures en matériaux hygroscopiques.

Dans ce contexte, le laboratoire GC2D développe une approche expérimentale et numérique s'appuyant sur l'injection de courant électrique afin de déterminer la répartition spatiale du taux d'humidité. La modélisation des mesures par un code à éléments finis est appliquée et des méthodes d'analyse inverse sont développées afin de passer des résultats de mesures dans différentes configurations à une cartographie des champs de résistivité.

Nous présentons dans ce papier deux problèmes indépendants :

- L'étude de l'influence de l'enfoncement et du rayon des électrodes sur l'évaluation de la résistivité.
- La validation numérique de l'inversion d'un modèle en ceinturage avec un gradient de résistivité concentrique.

Influence de l'enfoncement et du rayon des électrodes

Le logiciel à éléments finis Cast3M est utilisé pour effectuer la modélisation d'un échantillon de résistivité homogène de 1400 Ωm de dimensions 200 x 100 x 40 mm3, sur lequel est implanté un quadripôle d'électrodes (Fig. 1a) écartées de 20 mm. Un courant d'intensité I est transmis via les 2 électrodes d'injection (C1 et C2) et la différence de potentiel ΔV entre les 2 électrodes de réception (P1 et P2) est relevée (Fig. 1b).

Une modélisation avec des électrodes de rayons 1, 2 et 5 mm (Fig. 1d et Fig. 1e) et des enfoncements différents (de 0 à 100 mm) est réalisée. Une autre modélisation avec des électrodes surfaciques de rayons variables (de 1 à 9,5 mm) est également menée (Fig. 1c).

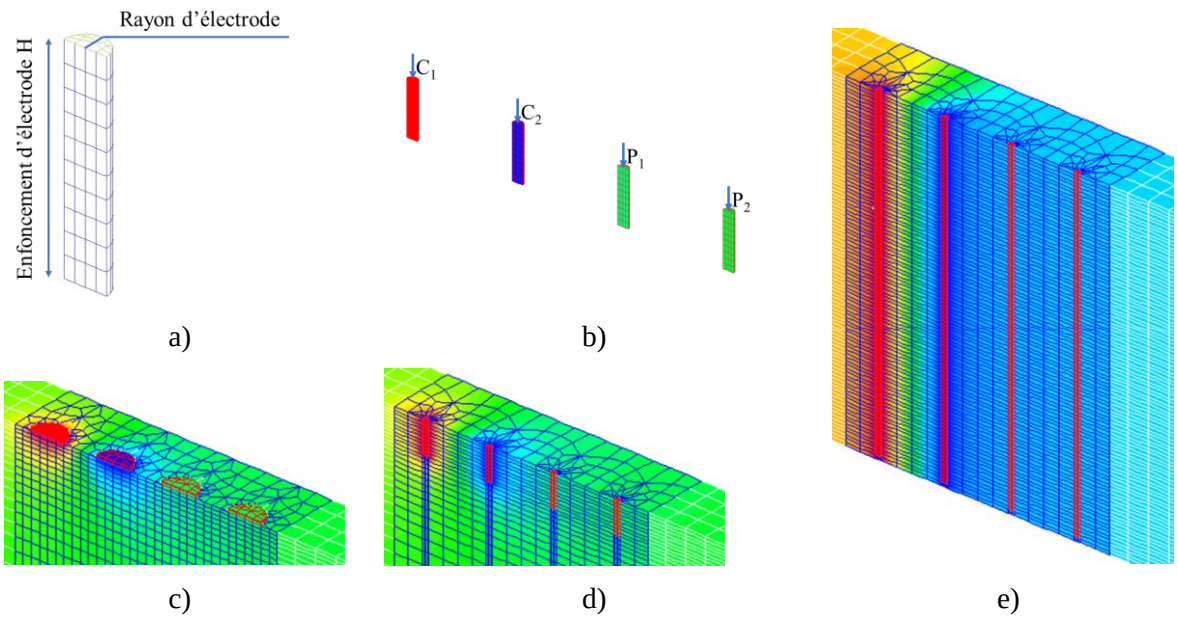
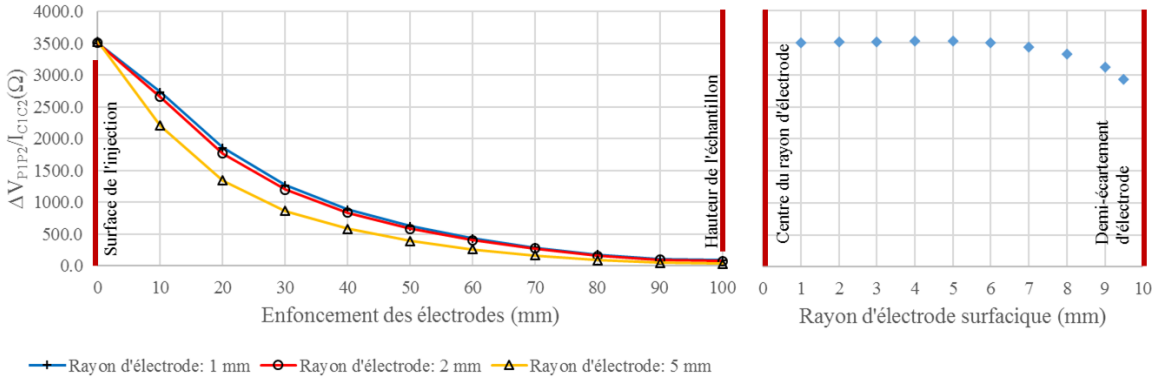


Fig. 1 : Maillage d'une électrode (a), injection de courant numérique (b) et visualisation des potentiels pour les cas des électrodes surfaciques (c) et d'enfoncement de 10 mm (d), 100 mm (hauteur complète de l'échantillon) (e)

On observe une diminution de la valeur $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ lorsque l'enfoncement de l'électrode augmente (Fig. 2a). En plus, pour un enfoncement donné, elle diminue également quand le rayon d'électrode augmente. Le résultat illustré dans la Fig. 2b montre que la valeur de $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ est élevée et stable jusqu'à un rayon de 6 mm puis diminue pour les électrodes surfaciques mais de manière beaucoup moins marquée que dans le cas de l'enfoncement.



(a) (b)

Fig. 2 : a) La relation entre le rapport $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ et l'enfoncement des électrodes

b) La relation entre le rapport $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ et le rayon des électrodes

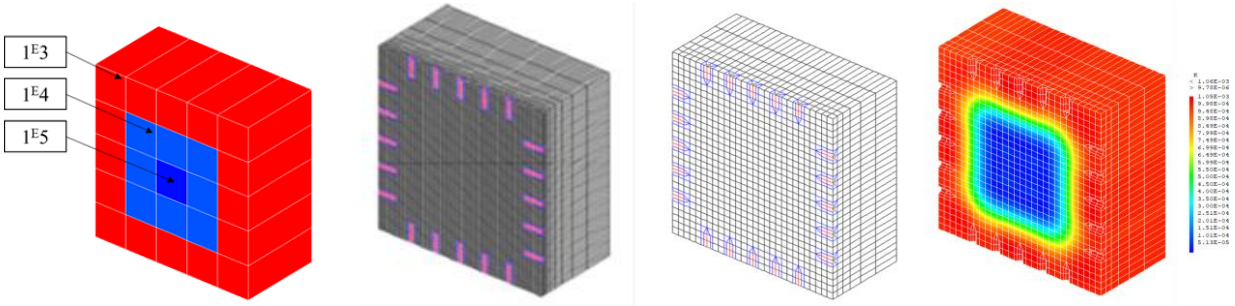
L'influence de l'enfoncement et du rayon sur la valeur $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ est un indicateur utile de sélection des dimensions d'électrodes appropriées pour l'injection de courant pour les applications expérimentales futures. En effet, une valeur de la $\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}$ faible, générée par un courant d'injection important favorisera la qualité des données expérimentales. Par conséquent, l'intérêt pour l'augmentation du rayon des électrodes apparait limité. Même s'il n'est probablement pas raisonnable d'envisager d'augmenter la longueur d'enfoncement jusqu'à l'autre extrémité de l'échantillon, la Fig.2a indique que pour obtenir un courant

suffisamment fort, l'électrode devrait être enfoncée dans les premiers centimètres de l'échantillon.

Optimisation du modèle avec multiplexage pour le ceinturage d'électrodes

La stratégie d'inversion numérique repose sur le développement d'une méthode inverse mise en œuvre avec le logiciel Cast3M pour modéliser et estimer le champ de résistivité réelle dans des échantillons de volume fini étudiés. Un échantillon de dimensions 95 x 95 x 95 mm^3 avec un ceinturage d'électrodes décrit par Pham & al. (2018) est repris pour notre étude.

Nous choisissons ici un gradient concentrique réaliste de résistivité qui évolue de 10^3 à 10^5 Ωm du bord au cœur (Fig.3a). Au terme d'un calcul direct, les valeurs numériques de ΔV/I obtenues sont utilisées en tant que données 'mesurées'. Nous optons pour une solution de départ de résistivité homogène de 5×10^6 Ωm suffisamment loin de la solution. L'ancien maillage du modèle (Fig. 3b) présentant des défauts impactant le temps de calcul, nous proposons dans ce papier un certain nombre de modifications (Fig. 3c).



a) b) c) d)

Fig. 3 : Maillage et champ réaliste de résistivité concentrique

L'inversion converge à la 20ème itération. Le résultat estimé est présenté dans la Fig. 3d avec une erreur moyenne de 6.5% et maximale de 20.5% sur les 525 quadripôles considérés.

Conclusion et Perspective

Le modèle direct d'injection électrique permet de mener un certain nombre d'études de sensibilités. Nous avons montré ici que l'influence du rayon des électrodes sur l'évaluation de la résistivité est négligeable. Pour obtenir des injections favorables aux applications expérimentales et inversions ultérieures de données, il est nécessaire de se concentrer sur l'effet efficace de l'enfoncement.

Sur le modèle en ceinturage avec multiplexage, la validation numérique ayant été faite, nous pourrons rapidement nous focaliser sur l'effet des valeurs mesurées des quadripôles traversants, contigus et sur la même face afin d'évaluer la robustesse de l'inversion pour déterminer la résistivité et préconiser ici aussi des stratégies d'instrumentation.

Références

Cast3m, (2012), a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission. http://www-cast3m.cea.fr/

Pham M. D., Nguyen T. A., Hafsa W., Angellier N., Ulmet L., Takarli M., Pop I. O., Dubois F. (2018). Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in structural timber. Conference: CoREST 2018 At: Vietnam

Poster C03

Effet de l'orthotropie du bois sur les vitesses de propagation des ondes ultrasonores

ZHANG Xi[1], TAKARLI Mokhfi[1], SAUVAT Nicolas[1], DUBOIS Frédéric[1], SBARTAÏ Zoubir Mehdi[2], COURREGES Fabien[3]

[1] GC2D, Univ. Limoges, EA 3178, 19300 Egletons, France
[2] I2M-TREFLE, UMR-CNRS 5295, Univ. Bordeaux, 33405 Talence, France
[3] XLIM-RESYST, UMR-CNRS 7252, Univ. Limoges, *87068 Limoges*, France
xi.zhang@unilim.fr

Mots clefs : Ultrason, onde de compression, bois, orthotropie, CND.

Introduction

Ce travail s'inscrit dans la cadre d'un projet, financé par la région Nouvelle Aquitaine, dont l'objectif est de proposer une méthodologie de couplage de techniques de contrôle non destructif (CND) afin de fiabiliser l'auscultation et la surveillance des éléments structuraux en bois. L'idée étant d'approcher au mieux les caractéristiques mécaniques du bois en service et de contrôler sa qualité pour prolonger la durée de vie de ce type de constructions à l'aide d'une maintenance préventive beaucoup plus économique que la maintenance curative. Le travail repose d'une part sur une identification en continu des champs hydriques par des méthodes électriques, électromagnétiques et ultrasonores ; et d'autre part sur une qualification de l'état de fissuration et de son évolution dans le temps à l'aide d'enregistrements acoustiques.

Donc parmi les méthodes non destructives proposées, nous avons celles basées sur la propagation des ondes élastiques comme les méthodes passives (émission acoustique) et méthodes actives (impulsions ultrasonores). La propagation de ces ondes dans le matériau bois est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs comme l'orthotropie, l'hétérogénéité naturelle, la présence de défauts, le champ hydrique et la nature de l'excitation et des ondes (compression, cisaillement et surface) se propageant dans le milieu. La caractérisation expérimentale a fait l'objet de nombreux travaux. Nous souhaitons toutefois étayer ces travaux par une approche théorique permettant par la suite de développer des modèles mécaniques par éléments finis prédictifs. Ce travail préliminaire vise donc à confronter ces deux approches traitant de l'effet de l'angle des fibres et l'effet des échelles sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans le Douglas, essence très employée dans les ouvrages mais présentant une texture forte.

Propagation et polarisation des ondes mécaniques dans un corps élastique orthotrope

L'étude de la vitesse de propagation des ondes élastiques (compression « P » et cisaillement « S ») permet la détermination des modules élastiques d'un matériau (Cuxac, 1991) (Espinosa, 2018). Après avoir déterminé la structure, c'est-à-dire la classe de symétrie du matériau considéré, le calcul des vitesses de phase pour une onde monochromatique quasi-plane peut se faire en considérant : la loi de Hooke, l'équation de l'équilibre dynamique en l'absence de forces de volume, l'équation de Christoffel et une solution monochromatique. Dans le cas du matériau bois, considéré comme structure orthotrope, les vitesses de propagation dans le plan (LR, avec θ = 90°, Fig. 2) sont données par les équations suivantes :

$$V_{\phi,SH}(\varphi) = \sqrt{\frac{\Gamma_{33}}{\rho}} \text{ ; onde de cisaillement à polarisation horizontale} \quad [1]$$

$$V_{\phi,P}(\varphi) = \sqrt{\frac{(\Gamma_{11}+\Gamma_{22})+\sqrt{(\Gamma_{11}-\Gamma_{22})^2+4\Gamma_{12}^2}}{2\rho}}\text{ ; onde de compression} \quad [2]$$

$$V_{\phi,SV}(\varphi) = \sqrt{\frac{(\Gamma_{11}+\Gamma_{22})-\sqrt{(\Gamma_{11}-\Gamma_{22})^2+4\Gamma_{12}^2}}{2\rho}}\text{; onde de cisaillement à polarisation verticale} \quad [3]$$

Dans un système orthotrope [repère (O, L, R, T), Fig. 2), le tenseur de Christoffel et les composantes de la matrice de raideur s'écrivent comme suivante avec φ est l'angle entre la direction de propagation et la ligne des fibres sur le plan (LR):

$$[\Gamma_{il}] = \begin{bmatrix} C_{11}\cos^2\varphi + C_{66}\sin^2\varphi & (C_{12}+C_{66})\sin\varphi\cos\varphi & 0 \\ (C_{12}+C_{66})\sin\varphi\cos\varphi & C_{66}\cos^2\varphi + C_{22}\sin^2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & C_{55}\cos^2\varphi + C_{44}\sin^2\varphi \end{bmatrix} \quad [4]$$

Les données mécaniques utilisées pour le calcul des vitesses sont celles du Douglas (Tab.1) (Kretschmann, 1999) (Espinosa, 2018). La masse volumique apparente (ρ), à 12% d'humidité interne, est égale à 448 kg/m3. Les résultats obtenus sont présentés en Fig. 3.

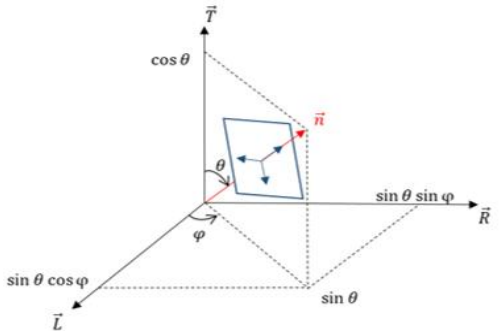


Fig. 1 : Définition des axes structuraux, des angles utilisés, de la direction de propagation et des directions de polarisation

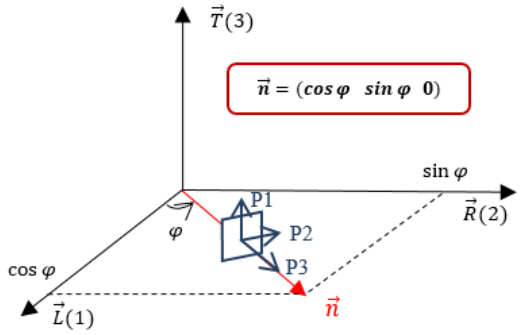


Fig. 2 : Une hypothèse de la propagation d'onde dans le plan LR

Tab. 1 : Propriétés élastiques du Douglas (Kretschmann, 1999) (Espinosa, 2018)

Module statique (GPa)	E(L)	E(R)	E(T)	G(RT)	G(LT)	G(LR)
	13,40	0,91	0,67	0,09	1,05	0,86
Coefficients de poisson	ν(TL)	ν (LT)	ν (RT)	ν (TR)	ν (RL)	ν (LR)
	0,022	0,449	0,390	0,287	0,020	0,292

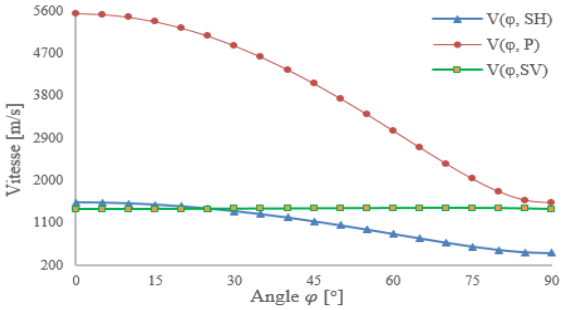


Fig. 3 : Variation des vitesses théoriques selon l'angle $\boldsymbol{\varphi}$ sur le plan (LR)

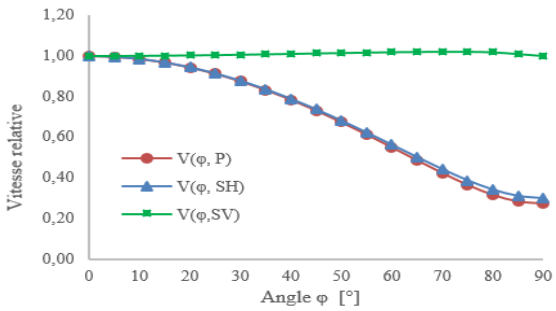


Fig. 4 : Variation des vitesses relatives selon l'angle $\boldsymbol{\varphi}$ sur le plan (LR)

Mesure expérimentale de $V_{\phi,P}(\varphi)$ dans le plan (LR)

Les mesures ultrasonores sont réalisées avec des éprouvettes de Douglas à deux échelles différentes : (1) une échelle métrique avec une poutre de dimensions L.3m x b. 15cm x h.15cm (Fig. 5) ; (2) et une échelle centimétrique avec un cylindre de dimensions D.20cm x H.20cm (Lamy, 2016) (Fig. 6.). Les résultats obtenus en Fig. 7 montrent des vitesses d'ondes de compression variant de 2200 à 5500 (m/s). Ces valeurs sont en adéquation avec celles que l'on peut retrouver dans la littérature (Beall, 2002) (Bucur, 2006). Nous notons principalement une parfaite concordance entre les résultats obtenus pour les deux échelles centimétrique et métrique. Cependant, si ces mesures sont parfaitement prédites par des lois empiriques classiques, elles ne coïncident pas avec les résultats de l'approche analytique présentée.

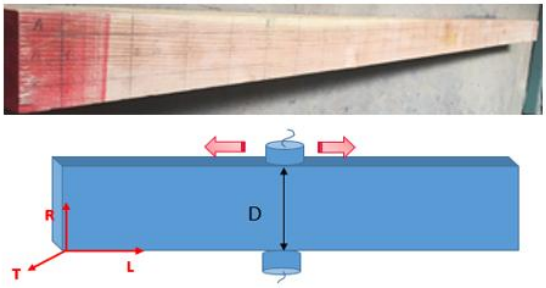


Fig. 5 : Eprouvette en échelle métrique

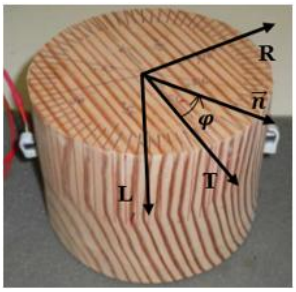


Fig. 6 : Eprouvette en échelle centimétrique

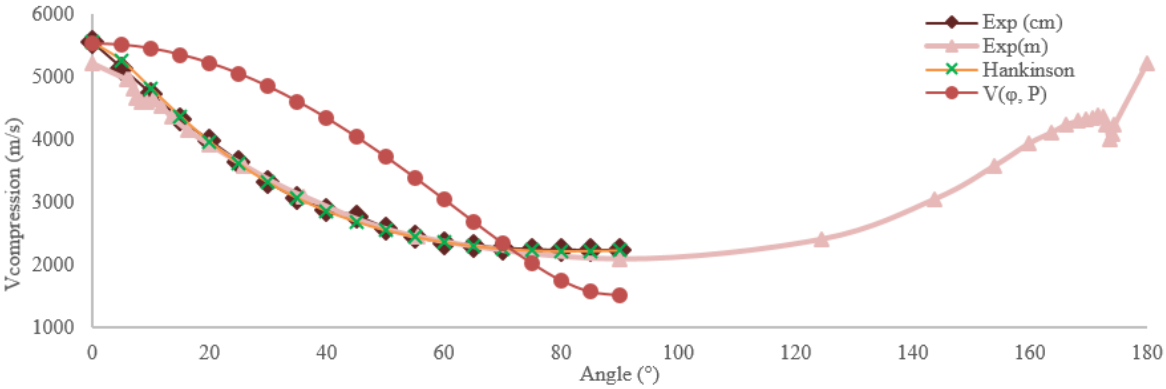


Fig. 7 : Evolution de la vitesse compression en fonction de l'angle des fibres. Comparaison entre résultats expérimentaux , analytiques ($V_{(\varphi,P)}$) et Hankinson.

Conclusions et perspectives

A l'échelle des éléments structuraux, et compte tenu de la forme relativement cylindrique des cernes de croissance, on représente le bois comme un matériau orthotrope. Cependant pour l'étude d'éprouvettes en échelle différente, et ce, devant la distance au cœur, il est souvent employé une orthotropie accompagnée d'un plan RT isotrope transverse. Cette modélisation, appliquée sur le plan (LR), nous a permis de mettre en exergue l'influence de l'angle des fibres sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ainsi, il en ressort que les ondes de compression sont sensiblement affectées par la rotation de la direction de propagation alors que les ondes de cisaillement le sont moins.

Les mesures expérimentales ont porté uniquement sur les ondes de compression et les résultats obtenus montrent également une grande sensibilité de la vitesse vis-à-vis l'angle des fibres. Cependant, nous constatons que le choix d'une structure orthotrope pour la

modélisation du Douglas ne permet pas de reproduire fidèlement l'allure de la courbe expérimentale. Des formules empiriques très satisfaisantes et très anciennes ont été proposées comme alternative pour traduire cette l'évolution de $V_{\Phi,P}$ fonction de l'angle φ (Hankinson et Osgood) (Kabir, 2001). Des travaux sont en cours pour comprendre la différence observée entre les approches expérimentale et théorique, notamment par l'usage d'une modélisation par éléments finis. De plus, une généralisation du développement au cas 3D et aux ondes de cisaillement est en cours de réalisation.

Références

Beall, F.C. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. Wood Science and Technology36, 3, 197–212.

Bucur, V. (2006). Acoustics of wood. Springer edition.

Cuxac, P. (1991). Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes. Vandœuvre-lès-Nancy, INPL.

Espinosa, L., Brancheriau, L., Prieto, F., and Lasaygues, P. (2018). Sensitivity of Ultrasonic Wave Velocity Estimation Using the Christoffel Equation for Wood Non-Destructive Characterization. BioResources 13(1), 918-928.

Kabir, M.F. (2001). Prediction of ultrasonic properties from grain angle. Journal of institude of wood science, 15(5).

Kretschmann, D.E. (1999). Mechanical Properties of Wood. Research General Engineer.

Lamy, F. (2016). Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois sous Sollicitations Mécanique et Climatique : Apports de l'Emission Acoustique. Thèse de doctorat, Université de Limoges.

Poster C04

Conception de mousses de tannins à hydrophobie modulée

CHAPUIS Hubert[1], BASSO Cécilia[2], PIZZI Antonio[2], GERARDIN-CHARBONNIER Christine[1]

[1]Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Faculté des Sciences et Technologies - Université de Lorraine, 54506 VANDOEUVRE-LES-NANCY Cedex, FRANCE
[2]LERMAB, ENSTIB - Université de Lorraine, 88026 EPINAL Cedex, FRANCE
[3]Institut Jean Lamour (IJL), ENSTIB - Université de Lorraine, 88026 EPINAL Cedex, FRANCE
hubert.chapuis@univ-lorraine.fr

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

Contexte et objectifs

De nos jours, un certain nombre de travaux de recherche traite du design, la caractérisation et le développement de matériaux innovants et d'origine biosourcée, lesquels s'opposent aux produits pétrosourcés liés à l'exploitation des ressources fossiles. Dans ce contexte, les mousses furaniques de tannins sont obtenues suite à une co-polymérisation d'alcool furfurylique et de tannins condensés et sont ainsi constitués à 90% de produits biosourcés. Pour cette raison, ce type de matériau est considéré comme une alternative fiable et prometteuse aux mousses industrielles de phénols et polyuréthane pour des applications diverses et variées. Grâce à leur faible coût de fabrication, leur forte résistance aux phénomènes de compression et leurs propriétés isolantes et auto-extinctrices, cette nouvelle génération de mousses est hautement considérée pour des applications en isolation du bâtiment (Basso (2014), Basso (2013), Tondi (2009), Pizzi (2008), Meikleham (1994)).

Cependant, ce type de matériau souffre habituellement d'une faible durabilité du fait de sa forte propension à absorber l'humidité, ce qui diminue ses performances. C'est ce point que nous nous attachons à améliorer dans le cadre des travaux de recherche décrits ci-dessous.

Matériel et méthodes

Sauf indication contraire, tous les réactifs utilisés pour la synthèse des tannins greffés proviennent de chez Sigma-Aldrich (Merck), France. Le suivi de greffage a été réalisé par spectroscopie infrarouge (IR) à l'aide d'un équipement "spectrum one" à transformée de Fourier, provenant de chez Perkin-Elmer (France), utilisé en mode ATR. Les tannins greffés ont également été caractérisés par spectrométrie MALDI-TOF. Les spectres ont été enregistrés sur un instrument AXIMA Performande (Shimadzu Scientific Instruments, Manchester – UK). La friabilité des mousses a été évaluée manuellement par frottage sur du papier Kimtech Science (Precision Wipes Tissue Wipers, Kimberly-Clark Professional, Nanterre – France). La densité et la porosité des mousses ont été déterminées par pycnométrie à l'hélium sur un appareil Accupyc II 1340 (Micromeritics, USA). Les mesures d'angle de contact ont été réalisées par la méthode de la goutte sessile sur un appareil DSA100 de chez KRÜSS (Hamburg – Germany). Enfin, les isothermes de sorption d'eau ont été obtenues sur 3Flex de Micromeritics (USA).

Résultats et discussion

La solution apportée par ce travail comprend deux étapes: une hydrophobisation chimique suivie ou précédée de l'étape de moussage. En effet, ces deux étapes sont interchangeables comme nous le montrerons ici. La réaction versatile d'hydrophobisation que nous proposons constitue la nouveauté apportée par ce travail de par le greffage de différents acides gras naturels sur les molécules de tannin. En effet, le caractère hydrophobe du matériau final peut être modulé grâce à la longueur de chaîne de l'acide gras utilisé dans l'étape de greffage.

La méthode est tout d'abord mise au point sur des polyphénols-modèles de faible poids moléculaire (flavonoïdes), avant d'être étendue aux tannins. Les matériaux obtenus ont été caractérisés par des méthodes chimiques: IR, MALDI-TOF, ainsi que des méthodes physiques: imperméabilité, friabilité, conductivité thermique (Delgado-Sánchez (2016), Rangel (2016)).

Conclusions et perspectives

La thématique abordée est ancrée dans la recherche appliquée avec des préoccupations industrielles mais nous permet également une approche plus fondamentale traitant de la réactivité chimique des tannins.

Références

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

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

Delgado-Sánchez C., Letellier M., Fierro V., Chapuis H., Gérardin C., Pizzi A., Celzard A. (2016) Hydrophobisation of tannin-based foams by covalent grafting of silanes, Industrial Crops & Products, 92: 116-126.

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

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

Rangel G., Chapuis H., Basso M.-C., Pizzi A., Delgado-Sánchez C., Fierro V., Celzard A., Gérardin-Charbonnier C. (2016) Improving water repellence and friability of tannin-furanic foams by oil-grafted flavonoid tannins, BioResources, 11(3): 7754-7768.

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

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

Poster C05

Influence de la pollution sur les propriétés du bois de la mangrove jouant un rôle de phytorémédiation : cas pratiques de *Rhizophora racemosa* et *Avicennia germinans*

MABICKA IWANGOU Saint Bickolard[1], BESSERER Arnaud [1], GERARDIN Philippe[1], SAFOU TCHIAMA Rodrigue[2], ANDZI BARHE Timoléon[2]

[1]LERMAB, Faculté des Sciences et Technologies Boulevard des Aiguillettes BP 70239. 54506 Vandœuvre lès Nancy Cedex – France
[2]Laboratoire de Recherche et de valorisation du Matériau Bois (Lareva Bois). Ecole Normale Supérieure d'Enseignement technique (ENSET). BP 3989, Libreville (Gabon)
saint-bickolard.mabicka-iwangou@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Palétuviers; éléments trace métalliques ; extractibles

Contexte et objectifs

Les mangroves jouent des rôles importants tant au niveau écologique que socio-économique et comptent parmi les écosystèmes les plus productifs en biomasse de la planète. Les arbres qui se développent dans ces milieux côtiers sont des halophytes facultatifs. Les palétuviers de la mangrove ont développé des systèmes racinaires constitués de racines échasses (*Rhizophora racemosa*) ou de pneumatophores (*Avicennia germinans*) qui leur permet de filtrer le sel. Le bois de *R. racemosa* est utilisé en structure alors que l'écorce et le bois de *A. germinans* sont utilisées en médecine traditionnelle (Rollet 1975). Au Gabon, les mangroves sont souvent confrontées à une pollution urbaine importante qui compromet le développement des espèces végétales et animales de l'écosystème. Les éléments polluants les plus fréquemment retrouvés dans les vases de mangroves situées à proximité des habitations sont les éléments traces métalliques (ETM) encore appelés métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Plusieurs études ont montrées que les palétuviers sont dotés d'une forte tolérance à la pollution aux ETM (Chowdhury et al. 2015; Agoramoorthy, 2008). Il est alors intéressant de considérer les palétuviers comme des essences utilisables dans des approches de phytomanagement. Les données de la littérature suggèrent que *R. racemosa* et *A. germinans* accumulent les ETM de manière différentes (Almahasheer, Al-Taisan, et Mohamed 2013; MacFarlane, Pulkownik, et Burchett 2003; Safou-Tchiama et al. 2017). Cependant, à ce jour aucune donnée n'est disponible quant à l'influence de la pollution aux ETM sur les propriétés du bois de *R. racemosa* et *A. geminans* et sur la localisation *in situ* des ETM. Dans une perspective de valorisation des bois issus du phytomanagement, l'étude de l'effet de la pollution sur la qualité des bois de palétuvier constitue une étape primordiale.

Afin d'étudier l'influence de la pollution urbaine sur les propriétés des bois de *R. racemosa* et *A. germinans*, des rondelles ont été prélevées sur des arbres de même circonférence à 1,3 m au-dessus du collet sur les stations d'Ambowé (pollution urbaine) ou de Mamboumba (Mangrove non perturbée). Les sites de prélèvement sont matérialisés sur la carte de la figure 1.

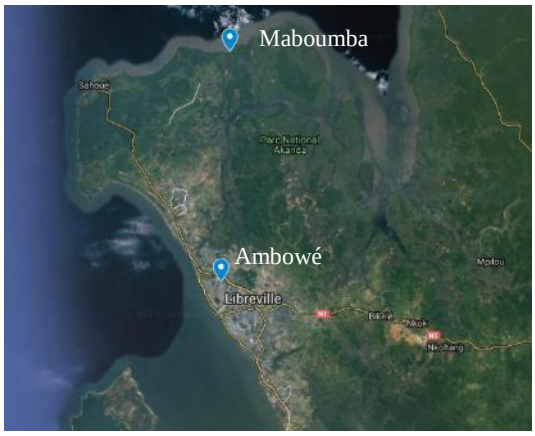


Fig. 1 : Sites de prélèvement des palétuviers au Gabon.

Matériel et méthodes

Les observations microscopiques ont été réalisées sur un microscope DM2700 M (Leica) pour les observations en épiscopie à partir de blocs de 1cm^3 et sur un microscope électronique à balayage Hitachi TM 3000 sur des blocs de 5mm^3. Les spectres infrarouges proches ont été réalisés sur un spectromètre frontier (Perkin Elmer). Les extractions ont été réalisées sur des sciures de bois (180µm) dans des Soxhlets de 250mL. Les traitements d'images ont été réalisés sur le logiciel FIJI. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Rstudio.

Premiers résultats

L'analyse macroscopique des échantillons a montré que la pollution cause la décoloration du bois parfait chez les deux espèces de palétuviers. Les premières analyses des coupes transversales de *R. racemosa* et *A. germinans* en microscopie à épiscopie ont montré que les bois exposés à une pollution urbaine présentent une diminution de la densité de vaisseaux (figure 2).

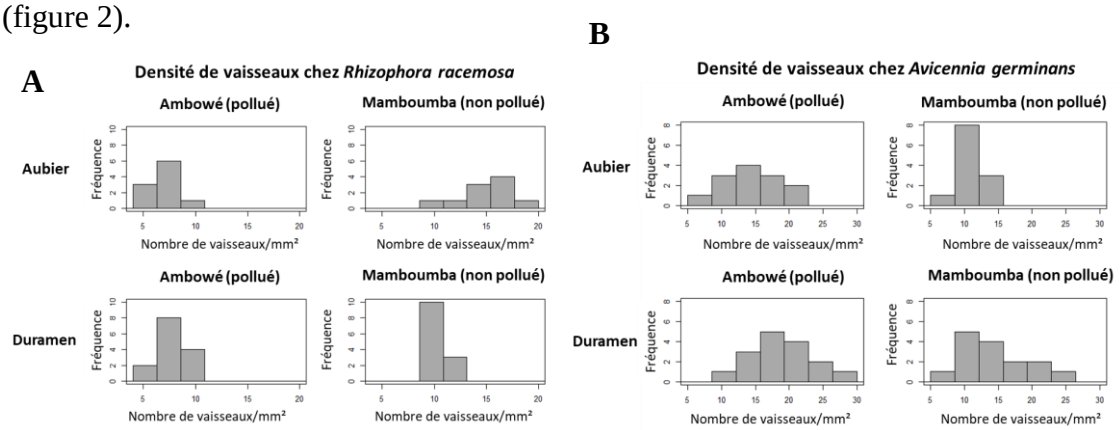


Fig. 2 : Histogramme de fréquence des densités de vaisseaux observés sur les coupes transversale des bois (A) *R. racemosa* ou (B) de *A.germinans* collectés sur les stations de Mamboumba et d'Ambowé. Pour chaque type d'échantillons 15 coupes ont été analysées.

L'analyse statistique des comptages a montré que l'aubier était d'avantage affecté que le duramen chez *R. racemosa* et chez *A. germinans* (ANOVA ; $p < 0,05$). Cependant, les deux essences répondent à la pollution de manière opposée : une diminution du nombre de vaisseaux chez *R. racemosa* et une augmentation chez *A. germinans.* Ces observations ont été confirmées par des observations en microscopie électroniques. De plus les analyses

statistiques révèlent que le diamètre des vaisseaux semble également altéré en présence de polluants. Afin de déterminer si la composition chimique des échantillons de *R. racemosa et A. germinans* collectés sur la station de Mamboumba diffère de celle des échantillons collectés à Ambowé, une acquisition de spectres proche infrarouge(NIRS) a été réalisée sur le plan transversal. L'analyse en composante principales des données des a permis de mettre en évidence une influence forte de la pollution sur la composition chimique du bois (figure 3).

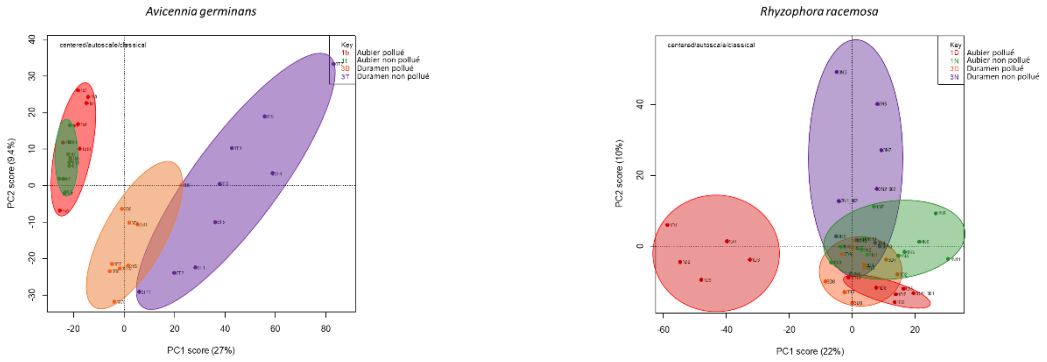


Fig.3 : Analyses en ACP des spectres NIRS effectués sur les échantillons de bois (aubier et duramen) collectés sur les sites de Mamboumba et Ambowé. A) *A. germinans* et B) *R. racemosa*.

Les extractibles ont été extraits des différents échantillons par des extractions séquentielles au Soxhlet. La comparaison des rendements d'extraction montre que les polluants inhibent la production d'extractibles chez les deux essences de palétuviers. Chez *A. germinans*, les duramens issus de la station d'Ambowé montrent une réduction de la teneur en extractibles d'un facteur 9,5 ; 4,66 et 1,8 dans les fractions dichlorométhane, acétone et éthanol-toluène par rapport aux duramens issus de Mamboumba. De manière intéressante ces différences sont moins marquées, chez *R.racemosa*. Seule une diminution d'un facteur 2,44 a été mesurée dans la fraction éthanol-toluène.

Conclusions et perspectives

Ces résultats suggèrent que la physiologie de l'arbre sur pied se traduit par une accumulation des polluants dans le bois qui diffère entre *A. germinans et R. racemosa.* La caractérisation des extractibles en GC-MS des différents échantillons ainsi que les mesures d'infra densité et le dosage des éléments minéraux par ICP-MS de contenu minéraux sont en cours.

Références

Agoramoorthy Govindasamy F.A .C., Minna J. H. (2008) Threat of Heavy Metal Pollution in Halophytic and Mangrove Plants of Tamil Nadu, India, Environmental Pollution, 155 (2), 320‑26.

Almahasheer H. B., Taisan W. A. Al., Mohamed M. K. (2013) Metals Accumulation in Grey Mangrove (Avicennia Marina (Forsk.) Vierh.). Inhabiting Tarut Bay, Eastern Saudi Arabia , Journal of Agricultural Science, 6 (1), 137.

Chowdhury Ranju Paulo J.C., Favas Pratas J., Jonathan M. P., Sankar Ganesh P., Kumar Sarkar. S. (2015) Accumulation of Trace Metals by Mangrove Plants in Indian Sundarban Wetland: Prospects for Phytoremediation, International Journal of Phytoremediation 17 (9), 885‑94.

MacFarlane G.R., Pulkownik A., Burchett M . D. (2003) Accumulation and Distribution of Heavy Metals in the Grey Mangrove, Avicennia Marina (Forsk.)Vierh.: Biological Indication Potential, Environmental Pollution, 123 (1), 139‑51.

Rollet B. (1975) Les utilisations de la mangrove. Les usages forestiers, Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée, 22 (10), 297‑340.

Safou T. R., Mabicka Iwangou S. B., Souloungangа P., Ikogou S., Kalendi Mathe N., Ndoutoume C. (2017) Anatomical Variability of the Trunk Wood and Root Tissues of Rhizophora Racemosa (G. Mey) and Avicennia Nitida (Jacq.) and Bio-Accumulation of Heavy Metals in Mangrove Trees, International Journal of Biological and Chemical Sciences 10 (6), 2526.

Poster C06

Caractérisations chimiques et activités antitermites des fractions volatiles (huile essentielle et résine brute) et lourde (résine purifiée) de Canarium schweinfurthii (Aiélé) du Gabon

BEDOUNGUINDZI Walter Fiacre[1,4], CANDELIER Kévin[2], EDOU ENGONGA Prosper[3,4], DUMARCAY Stéphane[1], THEVENON Marie-France[2], GERARDIN Philippe[1]

[1] LERMAB : Faculté des Sciences et Technologies – Université de Lorraine, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France
[2] CIRAD : Unité de Recherches BioWooEB, TA B 114/16, Montpellier, France
[3]LAPLUS : Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre, Ecole Normale Supérieure de Libreville, B.P 17009 Libreville, Gabon
[4]LaReVaBois: Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique.BP3989 Libreville, Gabon
walterbdou@yahoo.fr

Mots clefs : Résines ; huile essentielle ; *C.schweinfurthii* ; *Réticulitermes flavipes*

Contexte et objectifs

Les dégâts causés aux structures bois et autres matériaux cellulosiques par les termites dans le monde sont estimés à plusieurs milliards de dollars par an. Par le passé, des systèmes de protection du bois impliquant généralement une imprégnation de composés biocides actifs dans le bois étaient utilisés (créosote, lindane, CCA). Principalement à cause de leur caractère lessivable et donc de leur toxicité pour l'Homme et l'environnement, l'utilisation de ces produits a été largement limitée en Europe, voir même interdite dans certains pays depuis plusieurs années (2012 en France).

Cette pression environnementale croissante, ajoutée à la diminution des ressources fossiles, ont entrainé un changement important dans le domaine de la préservation des bois, conduisant à la recherche et au développement de nouvelles solutions non-biocides. Dans ce contexte, les produits bio-sourcés issus de la biomasse présentent l'avantage d'être moins impactant sur l'environnement dans la mesure où (i) ils nécessitent moins d'énergie pour être produits limitant ainsi les rejets de CO2 ; (ii) leurs caractères renouvelable et biodégradable les rendent moins néfastes pour l'environnement.

Les recours à des produits naturels issus de matières premières renouvelables, se substituant aux produits chimiques d'origine pétrochimique, connaît donc un intérêt grandissant.

Certains bois sont naturellement résistants aux attaques de termites et de champignons, en raison de la présence de divers composants actifs générés par leur système de défense naturelle, qui sont généralement obtenus par sécrétion de produits chimique dans les parois cellulaires du bois, tels que des huiles, des résines et des lignines. Les extraits, les huiles essentielles et les résines provenant de bois naturellement durables peuvent ainsi constituer des sources alternatives dans les systèmes de protection d'essences moins durables vis-à-vis des termites.

En Afrique centrale, la forêt tropicale représente une richesse naturelle majeure. Il faut bien préciser que la Forêt Gabonaise recouvre plus de 85% (soit 22 millions de m3) du territoire et est constituée d'une grande diversité d'essences tropicales valorisables (400). Les essences de bois tropicales étant pour la majeure partie très durable naturellement, cette surface forestière

d'Afrique Centrale représente une ressource considérable à exploiter en vue de valoriser les huiles essentielles et les résines que ces différentes essences de bois produisent naturellement.

L'objectif de ce travail consiste à analyser les compositions chimiques et à évaluer les propriétés antitermites de l'huile essentielle (HE) et des résines pure (RL) et purifiée (RHE) obtenue par un procédé de distillation à la vapeur (Clevenger), de l'Aiélé (Canarium schweinfurthii) provenant du Gabon.

Matériel et méthodes

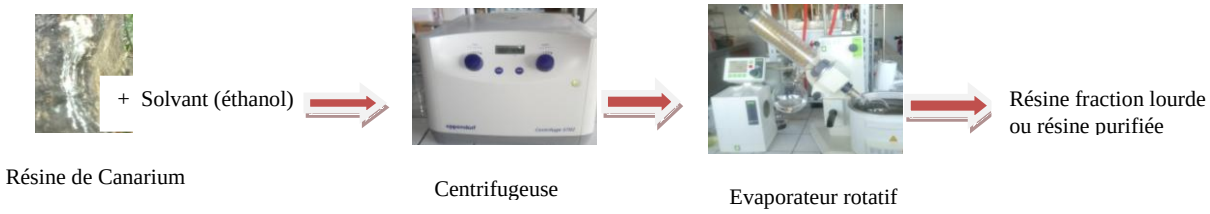


Fig. 1 : Purification des résines

Les huiles essentielles et résines ont été analysées par chromatographie en phase gazeuse sur un appareil Perkin Elmer Clarus 680 (GC) doté d'une colonne de silice fondue DB-5MS [(diméthyl- / diphényl-polysiloxane, 95: 5) (30 m, 0,25 mm, 0,25 µm) couplée à un spectromètre de masse (MS) Perkin Elmer Clarus SQ8 et géré par le logiciel Turbo Mass v.6.1. Les composants ont été identifiés par comparaison de leur spectre de masse avec ceux de la bibliothèque NIST 2005 via le logiciel NIST MS Search 2.0 (2011).

Test biologiques

- ✓ Test avec les résines et les huiles essentielles sur du papier filtres Whatman

Deux concentrations d'huiles essentielles et de résines d'Aiélé ont été testées vis-à-vis des termites par essais screening: rapports massiques de 50 :50 et 25 :75 (huile essentielle : acétone).

Pour les huiles essentielles, 70 µL de solutions ont été imprégnées sur des papiers filtres Whatman avant d'être exposés aux termites (Réticulitermes flavipes).

Pour les résines fraction lourde (RL) et résines fraction volatile (RHE), 90 µL de solutions ont été imprégnées sur des papiers filtres Whatman avant d'être exposés aux termites.

Les papiers imprégnés des différentes solutions à tester ont été séchés, soit à l'aire libre (20°C - 65% humidité relative (HR) ; 2 heures), soit à l'étuve (103°C ; 1 heure). Après séchage, chaque échantillon a été pesé avant d'être mis en contact avec les termites.

Les essais ont été réalisés dans des boîtes de Pétri (5,5 cm de diamètre) où 15 g de sable humide (1 volume d'eau pour 4 volumes de sable) ont été placés à la périphérie. Les papiers Whatman traités ont été placés sur une grille en plastique (pour éviter l'humidité) au milieu de la boîte de Pétri (exempte de sable) et 20 termites ouvriers ont été ajoutés à chaque dispositif de test. Les boîtes de pétri ont été placé à l'obscurité à 27°C, 75% humidité relative pendant 21 jours. Ces dispositifs ont fait l'objet d'un suivi régulier tout au long de l'essai. A la fin, les taux de survie des termites ont été déterminés, les échantillons ont été nettoyés et séchés selon la même procédure que celle utilisée après l'imprégnation (air libre ou 103°C) Trois types de témoins ont également été testé dans mes même conditions : papier imbibé d'eau, papier imbibé d'acétone et boites sans papier filtre afin de déterminer la fin de l'essai)).

✓ Test sur bois imprégné

Des éprouvettes d'aubier de pin sylvestre de dimensions 25×15×5 mm3 (LxRxT) ont été imprégnées soit d'huile essentielles (une seule concentration massique 5%), soit de résine fraction lourde (RL) ou de résine fraction volatile (RHE) selon les concentrations massiques suivantes: 1, 5, 10, 20 %. Les éprouvettes préalablement lessivées (selon la norme NF X 41-569 (2014)) ou non, ont été séchées à 103°C, pesées, puis conditionnées à 20°C ± 2°C et à une humidité relative de 65% ± 5% avant d'être exposées aux termites (Reticulitermes flavipes). Les tests screening de résistance aux termites ont été réalisés et adaptés en fonctions des directives de la norme EN 117 (2013). Chaque échantillon a été placé dans une boîte de Pétri de 9 cm de diamètre contenant 40 g de sable de Fontainebleau (4 volumes de sable / 1 volume d'eau déionisée). Des mailles en plastique ont été utilisées comme support pour l'échantillon afin d'éviter la saturation en eau. Un total de 50 termites ouvriers, une nymphe et un soldat ont été introduits dans chaque boîte de Pétri. Les boîtes de Pétri ont été placées à l'abri de la lumière, dans une chambre climatique réglée à 27 ± 1 ° C, avec une humidité relative supérieure à 75%. Trois réplicats de chaque traitement et de contrôle (pin imprégné / ou non d'éthanol) ont été testés. Après quatre semaines, les échantillons ont été prélevés et nettoyés, une cotation visuelle des dégâts a été effectuée, puis le nombre de termites encore en vie a été compté pour déterminer leur taux de survie. Les échantillons ont été séchés à 103 °C, pesés et les pertes de masse dues aux attaques de termites ont été calculées.

Résultats et discussions

Les composés majoritaires identifiés dans l'huile essentielle (HE) de Canarium après analyse à la GC/MS sont : la β-phellandrène (20,40%), β-cymène (17,33%), L-4-terpineol (16,22%), et terpinèn-4-ol (12,50%), et ceux identifiés dans la résine brute (RHE) sont alors : α-amyrine (29,1%), terpineol-cis-β (17,6%), L-4-terpineol (9,5%), O-cymène (6,4%) et la β-amyrine (5,7%)..

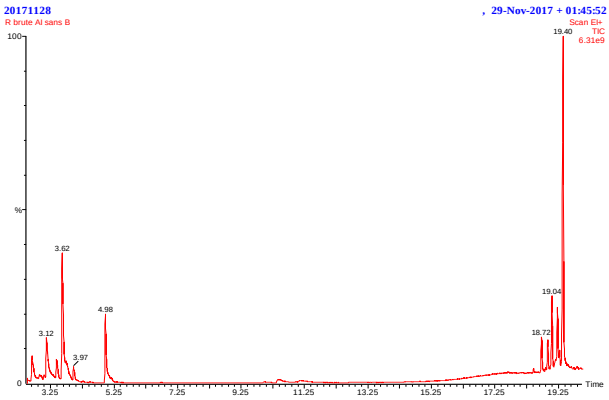


Fig. 2 : Chromatogramme de la résine fraction volatile

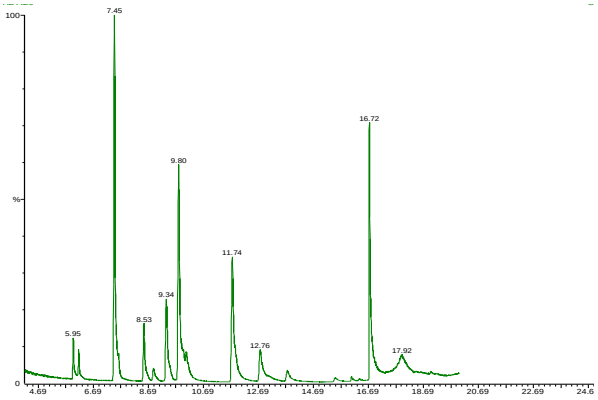


Fig. 3 : Chromatogramme de l'huile essentielle de Canarium

D'après le Tab.1, les résultats obtenus montrent que les éprouvettes traitées lessivées ou non lessivées sont moins dégradées que les éprouvettes témoins. La résine de Canarium, aussi bien, sa fraction volatile que lourde, confère une forte amélioration de la résistance face aux termites du pin sylvestre imprégné, avec des pertes de masses très faibles par rapport aux

témoins : soit 1,52% (5% huile essentielle) contre 14,02% (avec éthanol) pour les éprouvettes témoins. Les éprouvettes de pin sylvestre traitées par la résine de Canarium, aussi bien sa fraction volatile que lourde, lorsque ces dernières sont soumise au lessivage, sont par contre fortement attaquées et présentent les pertes de masse les plus élevées environ 13,01 % (1% résine fraction lourde), contre 14,02% (témoin avec éthanol) pour les éprouvettes témoins.

Tab. 1 : Effet des différents traitements sur la durabilité d'éprouvettes d'aubier de pin sylvestre après quatre semaines d'exposition à Reticulitermes flavipes

PMter(%) = Perte de masse due aux termites ; DS(%) = Déviation standard.

Traitement	**Avec délavage**					**Sans délavage**				
	PMter(%)	DS(%)	Taux de survie (%)	DS(%)	Cotation visuelle	PMter(%)	DS(%)	Taux de survie (%)	DS(%)	Cotation visuelle
1% RHE	**11,40**	1.94	**70,00**	5,29	**4**	**8,99**	0,90	**57,33**	4,62	**4**
5% RHE	**8,62**	0,94	**48,67**	19,01	**4**	**2,74**	0,04	**2,00**	3,46	**1**
10% RHE	**8,25**	0,48	**61,33**	3,06	**4**	**2,54**	0,14	**2,00**	3,46	**1 et 2**
20% RHE						**2,41**	0,05	**0,00**	0,00	**1**
1% RL	**13,01**	4,16	**78,67**	4,16	**4**	**8,18**	3,83	**52,67**	21,39	**3 et 4**
5% RL	**9,08**	1,11	**64,67**	6,11	**4**	**3,02**	0,35	**18,67**	4,62	**2**
10% RL	**6,83**	2,39	**40,00**	7,21	**3 et 4**	**2,73**	2,73	**2,67**	3,45	**1**
20% RL						**2,55**	2,55	**2,00**	3,46	**1**
5% HE						**1,52**	0,26	**0,00**	0,00	**0 et 1**
T pin	**11,33**	1,43	**71,60**	13,45	**4**	**11,33**	1,43	**71,60**	13,45	**4**
$T_{\text{pin avec éthanol}}$	**14,02**	2,34	**76,33**	8,89	**4**	**14,02**	2,34	**76,33**	8,89	**4**

Cotation visuelle : ''0'' - Aucune attaque; ''1'' - Tentative d'attaque; ''2'' - Attaque légère ; ''3'' - Attaque moyenne ; ''4'' - Attaque forte

Remerciements

Nous adressons nos remerciements au GDR Sciences du Bois pour son appui financier et à Campus France.

Références (style 'Titre 2')

Bédounguindzi W.F., Edou Engonga P., Candelier K., Dumarçay S., Mewono L., Thévenon M.-F., Gérardin P. (2017) Chemical compositions and anti-termite activities of essential oils from Gabonese Canarium schweinfurthii Engl, Dacryodes buettneri Engl and Aucoumea klaineana Pierre wood resins. Communication 48th IRGWP Annual Meeting, 4-8 June 2017, Ghent, Belgium.

Candelier K., Thévenon M.F., Collet R., Gérardin P., Dumarçay S. (2017) Chemical composition, Anti-fungal and Anti-termite activities of extractives compounds from thermally modified ash woods. Communication Woodchem 2017.

Poster C07

Criblage phytochimique, activité antifongique des composés extractibles du noisetier du Gabon vis-à-vis des champignons basidiomycètes *Poria placenta, Coniophora puteana, Gloephylum trabeum*

BOPENGA BOPENGA Christ Stone Arnaud[1], DUMARÇAY Stéphane[1], EDOU ENGONGA Prosper[2], GERARDIN Philippe[1]

[1]LERMAB, Faculté des Sciences et Technologies, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France.
[2]LAPLUS, Laboratoire Pluridisciplinaire des Sciences de Libreville, BP 17009 Ecole Normale Supérieure, Gabon
Christ-stone-arnaud.bopenga-bopenga@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Extractibles ; Antifongique ; Criblage phytochimique ; Noisetier ; *Coula edulis*, Gabon

Contexte/ Objectifs :

La forêt Gabonaise est l'une des plus grandes forêts d'Afrique après celle de la République Démocratique du Congo et du Cameroun. D'après l'Agence gabonaise d'études et d'observations spatiales (Ageos, 2015), elle représente près de 80% du territoire national du pays avec près de 400 essences de bois potentiellement valorisables dans le domaine de la chimie du bois mais dont une minorité seulement (environ une dizaine) a fait l'objet d'une étude approfondie dans ce domaine. Les autres essences sont qualifiées à tort ou à raison d'essences secondaires ; c'est le cas du noisetier du Gabon (*Coula edulis*). Au Gabon, ce bois est très durable et résistant aux attaques des champignons, des insectes et plus particulièrement à celles des termites. Il est recherché par les populations locales pour sa longévité. Son bois sert à faire du charbon de forge et entre dans la construction des cases comme poteaux et linteaux (Tchatat, 1999). Dans la pharmacopée traditionnelle au Gabon, *Coula edulis* intervient comme plante médicinale dans le traitement des maladies de l'appareil digestif, contre les lésions traumatiques, l'anémie, les blessures et les plaies (Walker et al., 1995). En Côte d'ivoire, l'écorce de *Coula edulis* est utilisée également en décoction pour la purgation ou comme lavement et contre les douleurs lombaires ou maux de reins (Téké et al., 2005). Dans ce contexte, il nous semblé intéressant d'étudier plus en détail cette essence, ayant pour le moment fait l'objet de peu d'études scientifiques, d'abord par la quantification et la caractérisation des composés extractibles de *Coula* puis par l'évaluation de l'activité de ces derniers vis-à-vis *de Poria placenta, Coniophora puteana, Gloephylum trabeum.* L'objectif général de ce travail étant de valoriser la qualité des bois tropicaux peu connus du bassin du Congo plus particulièrement du Gabon comme *Coula edulis*, tout en étant à la recherche de nouveaux produit biocides dans les domaines (préservation du bois, cosmétique, etc …).

Matériel et méthode

Pour déterminer les teneurs en extractibles, des extractions successives en utilisant des solvants de polarité croissante (Dichlorométhane, Acétone, Toluène/éthanol (2v/1v) et Eau) ont été réalisées au Soxhlet et au Dionex à partir des sciures finement broyées et tamisées (Ø=0,160mm) des écorce, aubier et duramen d'un tronc d'arbre provenant d'une forêt primaire Gabonaise dans la zône d'Ayémé, dont l'âge a été estimé entre 50 et 75 ans. Parallèlement un criblage phytochimique a été réalisé afin d'identifier les grandes familles

chimiques (polyphénols, saponines, flavonoïdes, stérols et terpènes, alcaloïdes) présentes dans les extractibles inspiré d'un protocole de la littérature (Uddin et al., 2011). Des essais d'inhibition de croissance de champignons (*Poria placenta, Coniophora puteana, Gloephylium trabeum*) en boîte de Pétri ont été menés afin d'évaluer l'activité antifongique des différents extraits comme décrit ci-dessous :

Fig. 1 : 4g malt extrait+2g agar (100mL d'eau distillée)

Fig. 2 : Milieux gélosé après autoclavage

Fig. 3 : Extrait dilué dans un minimum d'éthanol. Concentration 500 et 1000 ppm

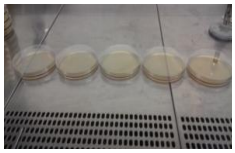


Fig. 4 : Distribution des milieux gélosé dans les boîtes de Pétri

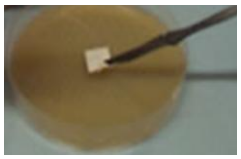


Fig. 5 : Inoculation de la souche fongique

Fig. 6 : Incubation à 22°C et 75% d'humidité relative

Tous les jours la croissance des champignons a été mesurée dans les boîtes, jusqu'à ce que les boîtes témoin soient totalement envahies (1 à 11 jours). L'essai est alors arrêté et les résultats des différentes incubations sont présentés sous forme de courbes de croissance en fonction du jour et du temps d'incubation afin de facilité les interprétations.

Résultats et discussion

Les résultats ont montré que les taux d'extractibles au niveau de l'écorce sont plus élevés que dans les autres parties de l'arbre quelque soit le type extraction. Les taux d'extractibles obtenus au dichlorométhane sont pratiquement semblables quelque soit le type d'extraction. Les taux globaux en extractibles obtenus au Soxhlet sont plus élevés que ceux obtenus au Dionex, ceci étant du aux faibles valeurs obtenues au Dionex avec le mélange toluène/éthanol (0,6% écorce ; 0,2% aubier ; 0,7% duramen) par rapport au Soxhlet (3,6% écorce ; 3,2% aubier ; 3,6 duramen). Le criblage phytochimique à révélé la présence des polyphénols, flavonoïdes, saponines et alcaloïdes dans toutes les fractions d'extractibles sauf dans les fractions au dichlorométhane de toutes les parties de l'essence. Les stérols et terpènes ont été identifiés dans les fractions au dichlorométhane au niveau de l'écorce et dans l'aubier et dans une moindre mesure dans la fraction acétonique au niveau de l'écorce. En dehors de la fraction au dichlorométhane du duramen qui n'a montré aucune activité sur la croissance des champignons, toutes les autres fractions ont montré le plus souvent un effet fongistatique à 500 ppm et un effet fongicide à 1000 ppm. Un exemple visuel des résultats est présenté dans la figure ci-dessous :

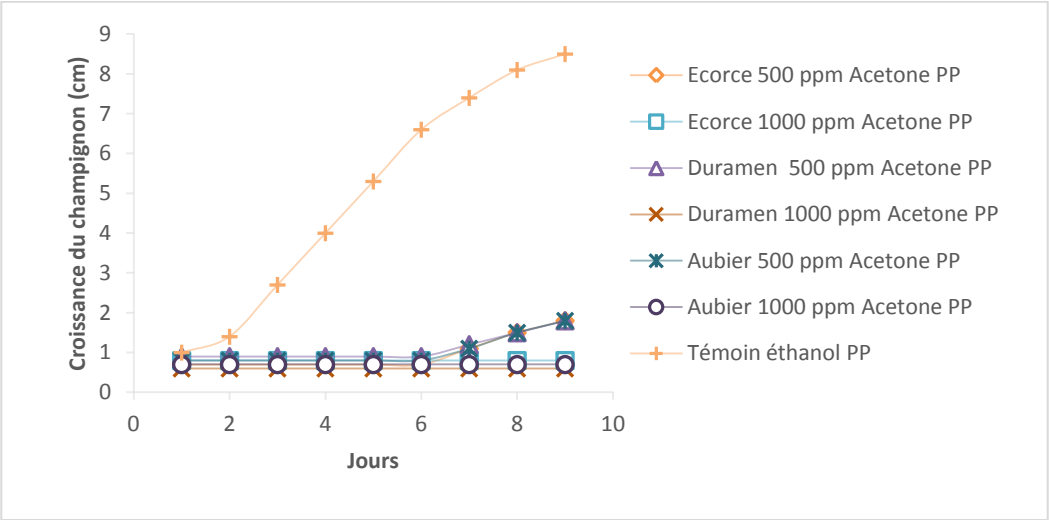


Fig. 7 **:** Effet des fractions acétoniques sur la croissance de *Poria placenta*

Conclusions et perspectives

Les teneurs en extractibles varient d'une partie du bois à une autre, avec le type d'extraction et le type de solvant utilisé. Le criblage phytochimique des extractibles à révélé la présence de différents groupe de molécule dans ces derniers. De ces résultats, il est ressorti que les extractibles de *Coula* peuvent être utilisé comme source pour le développement de nouveaux composés antifongiques (car contiennent des polyphénols qui présentent une bonne activité antifongique). Pour la suite il serait intéressant de réaliser des tests sur des termites puis caractériser les extractibles en effectuant des analyses GC/MS et même LC/MS.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale des Bourses du Gabon pour le financement de ces travaux. Le Laboratoire d'Etudes et Recherches sur le Matériau Bois ainsi que tout son personnel pour la fourniture du matériel nécessaire à la réalisation de ces travaux.

Références

Adeniyi Bola A., Obasi Oleh John, Lawal Temitope O. (2011) In-vitro antifungal activity of distemonanthus benthamianus stem. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 3(4): 52-56.

Kilic A., Niemz P. (2012) Extractives in some tropical woods. European Journal Wood and Wood Products, 70(1-3): 79-83.

Mori M., Aoyama M., Doi S., Kanetoshi A., Hayashi T. (1997) Antifungal activity of bark extract of deciduous trees. Holz als Roh und Werkstoff. 55: 130-132.

Moupela C., et al. (2010) Le noisetier d'Afrique (*Coula edulis Baill*) un produit forestier non ligneux méconnu. Biotechnol.Agron.Soc.Environ, 5(3) : 451-461.

Nursinta A.R., Dumarçay S., et al. (2017) Characterization of bark extractives of different industrial Indonesian wood species for potential valorization. Industrial Crops & Products 108 (2017) 121-127.

Poster C08

Identification of phenolic compounds in *Prosopis juliflora* by liquid chromatography - electrospray ionization mass spectrometry

CHEPKWONY Sarah[1, 2], DUMARCAY Stéphane [1], CHAPUIS Hubert [1], KIPROP Ambrose [2], GERARDIN Philippe [1] and GERARDIN-CHARBONNIER Christine [1]

[1]Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), EA 4370- USC INRA, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70 239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France
[2]MOI University, School of Biological and Physical Sciences, P.O BOX 3900-30100, Eldoret-Kenya
sarah.chepkwony@univ-lorraine.fr

Keywords: LC-MS/MS; Wood extractives; Flavonoids; Mesquitol; Glucosides.

Context and objectives

Prosopis juliflora is a shrub, or sometimes a tree, that has recently generated a lot of interest to scientists due to the presence of the mesquitol compound that has been found to have antioxidant properties. Lakshmibai (2016); Sirmah (2011). It is also known to be highly adapted to dry lands and was therefore introduced in Kenya to curb desertification. Pasiecznik (2001). However, this shrub is seen as a great nuisance by locals due to its uncontrolled ability to spread into crop fields, grazing areas, wetlands and lake shore areas. Muturi (2012); Shackleton (2014).

Efforts to eradicate the plant completely have failed. According to studies done in Eritrea by Bokrezion (2008), *Prosopis* plants re-grew in a week's time after they had been cut down. A survey done of local communities around Lake Baringo in Kenya showed that 85-90 % of respondents to a questionnaire favored complete eradication of the invasive *Prosopis* species. Mwangi (2008). This shows that the *P. juliflora* has become a major threat to many livelihoods hence the need to valorize it.

Phenolic compounds are of considerable interest due to their antioxidant properties. They are biosynthesized in plants in response to external stresses (ultraviolet light, microbial attack, and physical injury).

The aim of this study was to carry out a substantive study on the identification of phenolic compounds in *P. juliflora*. This was done using wood extracts from three different regions in Kenya; Baringo County, Garissa County and Turkana County. Identification of these phenolic compounds is necessary in the study of the antioxidant properties of *P. juliflora* towards the valorization of its extracts for future potential use in industrial applications (food industry, as detergents, in cosmetics or as innovative materials).

Materials and methods

Plant samples were collected from their natural habitats in Baringo County (latitude 0° 28' 0" N, longitude 35° 58' 0" E), Garissa County (latitude 0° 27' 09" S, longitude 39° 38' 45" E) and Turkana County (latitude 03° 09' N, longitude 35° 21' E) in Kenya. They were stems from both the big trees, aged more than eight years, and the small trees, aged less than four years. Substantive studies were done to determine the compounds present in the *P. juliflora*. The first step involved serial extraction using different solvents with different polarities. The Dionex accelerated solvent extractor was used in the extraction. GC-MS analysis was

performed on a Clarus 500 GC gas chromatograph coupled to a Clarus 500 MS quadrupole mass spectrometer. Identification of the specific compounds present in the *P. juliflora* was thereafter done thanks to the use of LC-MS/MS technique. This was achieved by comparison of experimental retention times and UV-MS spectra to bibliographic data and standard compounds.

Results and discussion

The GC-MS analyses of these extracts showed presence of high amounts of flavonoids in the acetonic extracts compared to the other solvents hence, the acetonic extracts were analysed using a reversed-phase liquid chromatography coupled to electrospray ionization – tandem mass spectrometry (LC-ESI-MS/MS). 15 chemical compounds that were tentatively identified were phenolic compounds and their glycosylated derivatives. The predominant phenolic compounds were taxifolin, kaempferol, quercetin, 4’-O-methylgallocatechin, catechin and mesquitol.

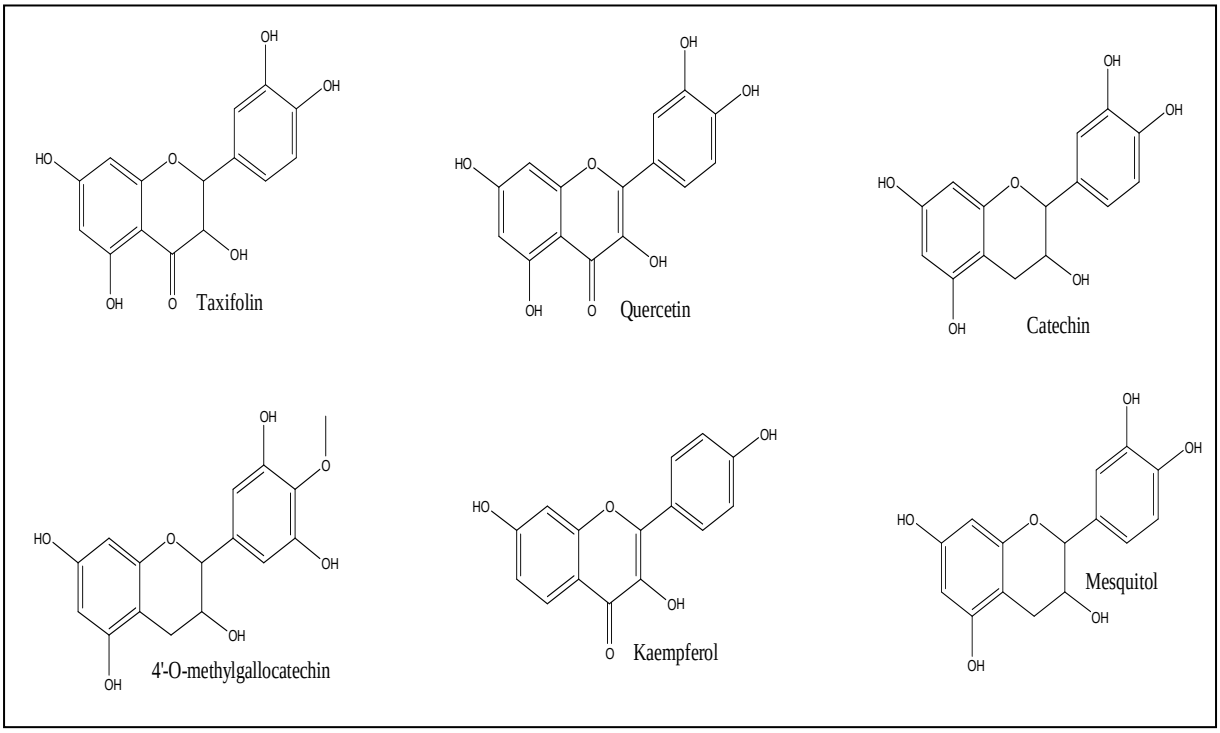


Fig. 1 : Predominant phenolic compounds in *P. juliflora*

For the first time, a new compound believed to be a B-type proanthocyanidin of mesquitol was identified.

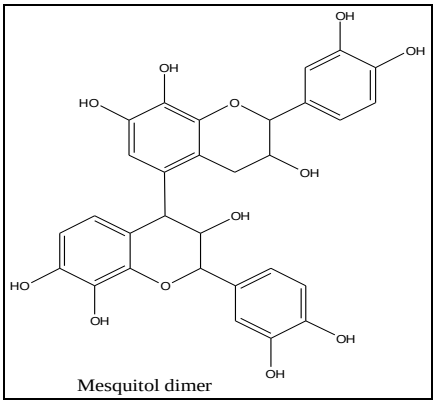


Fig. 2 : B-type proanthocyanidin of mesquitol found in *P. juliflora*

This identification was based on the MS/MS diagnostic ions.

Conclusion and perspectives

The results illustrate a rich array of phenolic compounds present in *P. juliflora* with mesquitol compound being the most abundant compound. The study prospects to isolate and carry out studies on the physical and chemical properties of all the identified compounds.

References

Bokrezion H. (2008). The ecological and socio-economic role of *Prosopis juliflora* in Eritrea. Academic Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Germany, (PhD report).

Lakshmibai R., Amirtham D., Radhika S. (2016). Preliminary phytochemical analysis and antioxidant activities of *Prosopis juliflora* and *Mimosa pudica* leaves. In International Conference on Industrial Scientific Research Engineering, (pp. 040-044).

Muturi G. M. (2012). Ecological impacts of *Prosopis* invasion in Riverine Forests of Kenya. Academic Dissertation, Wageningen University, (PhD report).

Mwangi E., Swallow B. (2008). *Prosopis juliflora* invasion and rural livelihoods in the Lake Baringo area of Kenya. Conservation and Society, 6 (2), 130.

Pasiecznik N. M., Felker P., Harris P. J., Harsh L., Cruz G., Tewari J. C., Maldonado L. J. (2001). The *'Prosopis Juliflora' - 'Prosopis Pallida'* Complex: A Monograph (Vol. 172). Coventry: HDRA.

Shackleton R.T., Le Maitre D. C., Pasiecznik N. M., Richardson D. M. (2014). *Prosopis*: a global assessment of the biogeography, benefits, impacts and management of one of the world's worst woody invasive plant taxa.

Sirmah P., Mburu F., Iaych K., Dumarçay S., Gérardin P. (2011). Potential antioxidant compounds from different parts of *Prosopis juliflora.* Journal of tropical forest science, 187-195.

Poster C09

Valorisation des pentoses issus du hêtre : nouveaux composés amphiphiles tensio-actifs et/ou gélifiants à base de xylose

VEROVE Clémentine[1], CHAPUIS Hubert[1], GERARDIN-CHARBONNIER Christine[1]

[1]Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), EA 4370- USC INRA, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70 239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France
clementine.verove@univ-lorraine.fr

Mots clefs : xylose ; biomasse lignocellulosique ; amphiphiles biosourcés ; tensio-actifs ; gélifiants

Contexte et objectifs

Les composés biosourcés font actuellement l'objet de nombreuses études en raison de leurs propriétés biodégradables et leur biocompatibilité. Bien que l'attention se soit d'abord portée ces dix dernières années sur la chimie des agro-ressources, elle se tourne maintenant vers la biomasse lignocellulosique, en particulier issue du bois, en tant que nouvelle source de composés.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons plus particulièrement aux pentoses issus des hémicelluloses de feuillus, tels que le hêtre. Cette essence, particulièrement présente en Lorraine (IFN (2010)) et dans les régions et pays limitrophes, est relativement peu valorisée. La valorisation des hémicelluloses issues des coproduits de l'industrie de première transformation du bois peut donc représenter un plus pour cette filière.

Plus spécifiquement, nos études se portent sur la valorisation du xylose *via* des modifications chimiques pour concevoir des composés bimodulaires amphiphiles à propriétés tensio-actives et/ou gélifiantes avec :

- Un sucre ou dérivé comme tête polaire,
- Une chaîne carbonée de longueur variable comme queue hydrophobe.

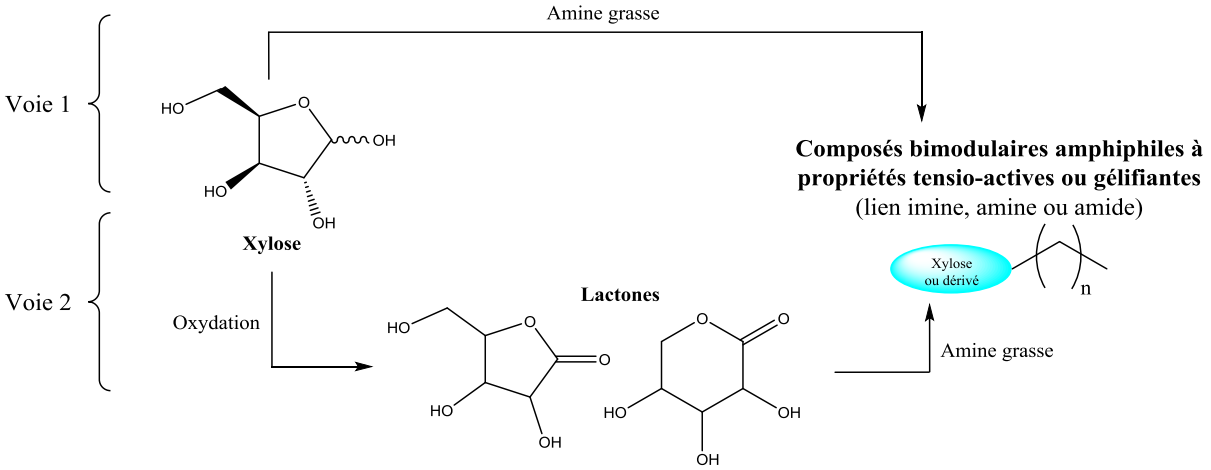


Fig. 1 : Voies de synthèses des composés amphiphiles cibles

L'introduction de motifs structurels issus de la biomasse tend à améliorer la biodégradabilité et la biocompatibilité des composés (Deleu (2011), Clemente (2011)). L'objectif est donc de

remplacer les composés pétrochimiques par des homologues xylosourcés dans diverses applications telles que la cosmétique ou la pharmaceutique.

Résultats et discussion

La première voie de synthèse (Fig. 1, Voie 1) a permis d'obtenir une gamme de composés à base de xylose présentant des comportements différents selon :

- La nature de la liaison entre le sucre et la chaîne carbonée : une liaison imine entre les blocs constitutifs (intermédiaire réactionnel) induit des propriétés gélifiantes dans le milieu réactionnel, constitué d'eau et de méthanol (50/50 en volume). Un lien amine entre les parties polaires et hydrophobes confère des propriétés moussantes dans l'eau.
- La longueur de chaîne carbonée : la solubilité et le pouvoir moussant en dépendent.

La stabilité de l'intermédiaire imine dans l'eau en fonction du temps, ainsi que ses propriétés gélifiantes dans divers solvants ont été testées.

Les produits finaux (i.e. les bimodules avec lien amine) possèdent des propriétés moussantes dans l'eau. Leur solubilité dans ce solvant décroit avec l'augmentation de la longueur de chaîne carbonée.

La deuxième voie de synthèse vise à obtenir une gamme de composés bimodulaires avec un lien amide entre le dérivé de sucre et la chaîne grasse en deux étapes, dont la première consiste à oxyder le xylose en lactones. La seconde étape est réalisée par amidification (Fig. 1, Voie 2). L'oxydation du xylose conduit à un mélange de deux lactones : la δ-xylonolactone et la γ-xylonolactone. Au vu des spectres RMN, la première semble être majoritaire. La condensation d'amine grasse de longueur de chaîne variable permet de synthétiser une gamme de composés bimodulaires amphiphiles à lien amide.

Les synthèses sont pensées pour être les plus « vertes » possibles, i.e. respecter au mieux les principes de la chimie verte.

Conclusions et perspectives

Les composés à base de xylose, synthétisés efficacement par des méthodes respectueuses de l'environnement, présentent des propriétés moussantes et gélifiantes. Les propriétés moussantes seront caractérisées selon les normes ISO en vigueur. En ce qui concerne les propriétés gélifiantes des intermédiaires, mais aussi des produits finaux, des tests sont en cours dans divers solvants afin de déterminer la concentration minimale de gélification ainsi que la stabilité des gels entre autres.

Une autre voie de synthèse de composés amphiphiles tensio-actifs et/ou gélifiants est aussi étudiée : elle consiste à insérer entre le sucre et la chaîne grasse un acide aminé tel que la Lysine (issue de la betterave à sucre).

Références

Clemente MJ. Et al. (2011) Synthesis and characterization of maltose-based amphiphiles as supramolecular hydrogelators, Langmuir, 27, 15236-15247

Deleu M. et al. (2011) Synthesis and physico-chemical characterization of bolaamphiphiles derived from alkenyl D-xylosides, New J. Chem., 35, 2258-2266

IFN, La Forêt Française-Les Résultats Pour La Région Lorraine (2010)

Poster C10

Gélifiants trimodulaires biosourcés : Synthèse et Caractérisations

ZANG ONDO Cherryl Mirabelle[1], CHAPUIS Huber[1], GERARDIN-CHARBONNIER Christine[1]

[1]Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau bois/ Université de Lorraine – Faculté des Sciences et Technologies, Campus aiguillettes, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy
cherryl-mirabelle.zang-ondo@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Biomasse ligno-cellulosique ; Glucose ; Acides aminés ; Amphiphiles trimodulaires biosourcés, Gels supramoléculaires ; Synthèse organique

Contexte et objectifs

L'utilisation de matières premières d'origine renouvelable suscite un intérêt croissant dans le cadre de la chimie de développement durable. Cet aspect est largement abordé aujourd'hui dans différents domaines (Rosentha et al. 2018). Ainsi, les industriels du monde de la chimie montrent une volonté affirmée de développer et d'utiliser les molécules naturelles destinées à remplacer les composés d'origine pétrochimique afin de donner une connotation verte à leurs produits. C'est dans ce contexte que la chimie biosourcée est une alternative non négligeable car elle permet par exemple d'utiliser la biomasse ligno-cellulosique issue du bois (Alario, et al. 2014). Il s'agit donc d'une part de développer des méthodes de synthèses originales et écologiques (Obounou Akong et al. 2015) et d'autre part d'obtenir des composés verts respectueux de l'environnement.

Ainsi, un des objectifs des travaux développés au sein du LERMAB dans l'équipe de valorisation des sous-produits de l'industrie de premières transformations du bois est de concevoir et de synthétiser des composés amphiphiles, gélifiants biocompatibles pour des applications diverses (Alliot, 1999 ; Balland, 2003 ; Obouno Akong, 2012). Les gels supramoléculaires issus de petites molécules connaissent un développement de plus en plus important par rapport à leurs homologues polymériques. En effet, contrairement aux gélifiants polymériques ils sont réversibles sous l'action de certains stimuli (température, pH, ultrasons…) grâces à leurs propriétés d'auto-assemblage *via* des interactions non-covalentes.

Matériel et méthodes

Les molécules ciblées par nos travaux sont des composés trimodulaires constitués :

- D'un polyol ou d'un de ses dérivés obtenus à partir de la biomasse ligno-cellulosique issue du bois en tant que tête polaire,
- D'un acide aminé trifonctionnel tel que la lysine, sous-produit de l'industrie sucrière utilisé comme module de jonction,
- Et d'un acide gras ou de l'un de ses dérivés issu d'huiles végétales et utilisé en tant que queue hydrophobe.

La stratégie permettant d'obtenir ces composés est la « synthèse modulaire ». Elle consiste à préparer indépendamment les modules hydrophiles et hydrophobes ensuite les assembler. La première étape est de préparer un bimodule hydrophobe (lysine-acide gras), suivie par le greffage du glucose et/ou de la gluconolactone obtenus par l'intermédiaire de réactions d'amination réductrice et de transamidation.

Résultats

A ce jour, les composés trimodulaires avec la chaîne grasse fixée en α du module de jonction (lysine) et le module hydrophile greffé en ε (lysine) ont été obtenus.

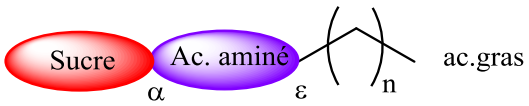


Fig 1: Trimodule amphiphile

Des premiers résultats de gélification sont présentés ici, de même que l'évaluation des propriétés physico-chimiques (concentration minimum de gélification, température de dégélification, MEB). D'autres analyses sont en cours afin de mesurer la viscosité des gels correspondants.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG).

Références

Alario, F., Marion, P. (2014) Pétrochimie et chimie biosourcée, Panorama, ifp Energies nouvelles.

Alliot, V. (1999) thèse « Des molécules de la biomasse vers des tensioactifs trimodulaires originaux » Univ. Henri Poincaré.

Balland, H., 2003) thèse « Conception d'amphiphiles trimodulaires à partir de produits de la biomasse » Univ. Henri Poincaré.

Obouno Akong, F. (2012) thèse « Composés des amphiphiles originaux à propriétés gélifiantes: synthèse et caractérisations physico-chimiques. Application à la formulation de produits de préservation du bois hydrosolubles ». Univ. Lorraine.

Obounou Akong, F., Bouquillon, S. (2015) Efficient synthese of bolaform surfactants from L-rhamnose and/or 3-(4-hydroxyphenyl)propionic acid, Green Chem., 17, 3290-3300.

Rosentha, J. et al (2018) clean coocking and the SDGs: Intergrated analytical approaches to guide energy interventions for health and environment goals. Energy for Sustainaible Development, 42 (supplement C) 152-159

Poster C11

Analyse dendrochronologique des carottes d'épicéas modernes de la collection de J.-L. Giddings : Apports pour la datation et la dendro-provenance des bois archéologiques alaskiens

TAÏEB Juliette[1], ALIX Claire[2], JUDAY Glenn P. [3], ELLIOT Michelle[1], PETIT Christophe[1]

[1]UMR 7041 ArScan – Archéologies environnementales, CNRS/Univ. Paris 1 Panthéon-Sorbonne
[2] UMR 8096 Archéologie des Amérique, CNRS/Univ. Paris 1 Panthéon-Sorbonne
[3] School of Natural Resources and Extension, University of Alaska Fairbanks
juliette.taieb@etu.univ-paris1.fr

Mots clefs : Dendro-archéologie ; Alaska ; Préhistoire récente ; Bois flotté ; J.-L. Giddings

Contexte et objectifs

Le nord-ouest de l'Alaska, au carrefour de l'Asie et de l'Amérique du nord, est une région essentielle pour la compréhension des dynamiques de populations et de peuplement du deuxième millénaire apr. J.-C. dans l'extrême nord du continent nord-américain.

Le long des littoraux alaskiens, dans un environnement de toundra dépourvu d'arbres, la principale ressource ligneuse est le bois flotté – qui se présente sous forme de grume – originaire des forêts boréales subarctiques. Ce bois est une ressource exogène dont la distribution et l'abondance diffèrent en fonction des évènements climatiques et de l'environnement, des courants marins et de la direction des vents, de l'érosion des rives des fleuves et du dégel des rivières au printemps (Alix 2005; Giddings 1943; Hellmann et al. 2013).

Durant les années 1940, l'archéologue américain J.-L. Giddings, pionnier de la dendrochronologie en Alaska, a cherché à dater l'établissement des chasseurs-cueilleurs semi-nomades de la préhistoire récente du nord-ouest de l'Alaska chez qui le bois est une ressource essentielle, omniprésente dans leur quotidien (Alix 2016; Giddings 1952). Ses recherches l'ont conduit à collecter de nombreux disques de bois archéologiques et carottes modernes de *Picea glauca* [Moench] Voss, grâce auxquels il a pu construire une première séquence dendrochronologique millénaire (978 à 1941 apr. J.-C.) pour la vallée du fleuve Kobuk, région boisée proche du littoral de la mer des Tchouktches. Cette séquence de référence encore utilisée aujourd'hui a aidé à établir la chronologie des différentes variantes culturelles du IIème millénaire apr. J.-C. (Giddings 1952).

Cependant, dans les années 1940, Giddings n'avait pas accès aux outils de mesure et d'analyse aujourd'hui disponibles. Toutes ses séquences individuelles et ses chronologies ont donc été construites manuellement. Elles ne reposent, par conséquent, que sur un faible nombre d'échantillons, d'autant plus pour les périodes anciennes (Giddings 1941, 1952). De plus, suite au développement des méthodes de datation radiocarbones, les recherches dendro-archéologiques n'ont pas été poursuivis par les archéologues de l'Arctique (Nash 2000). Le contexte chronologique de la préhistoire récente du nord-ouest de l'Alaska, fondé sur des dates radiocarbones et dendrochronologiques, reste encore aujourd'hui trop imprécis.

En contexte archéologique, le long des littoraux alaskiens, plusieurs défis se présentent de par la nature du matériau et sa singularité : premièrement, les bois flottés peuvent provenir de lieux divers et, deuxièmement, lorsqu'une date est attribuée à un bois flotté archéologique, elle correspond au dernier cerne de croissance présent, elle ne représente pas la date d'utilisation du bois par les populations archéologiques ni nécessairement la date d'occupation du site.

La collection historique de Giddings, récemment relocalisée, comporte de nombreuses carottes de bois encore inexploitées et offre donc la possibilité d'apporter des informations climatiques et chrono-culturelles à ce cadre chronologique encore trop imprécis. Dans ce poster, nous présentons une première analyse de l'ensemble des carottes d'épicéas modernes (*Picea glauca*) collectées par Giddings en 1941 et 1942, et mesurées ou remesurées depuis 2015. Notre étude a été guidée par plusieurs questions : 1 - Quels sont les apports de l'analyse dendrochronologique de ces tarières à la datation et à la dendro-provenance des bois flottés archéologiques du littoral alaskien ? 2 - Comment la ré-évaluation de ces séquences de largeurs de cernes participe à la mise en place d'une chronologie de référence robuste ?

Matériel et Méthodologie

Cette étude porte sur l'analyse dendrochronologique de l'ensemble des tarières de *Picea glauca* [Moench] Voss modernes de la collection de Giddings, soit 429 séries de largeurs de cernes datées de 1520 à 1941 apr. J.-C., issues de 43 peuplements échantillonnés dans le nord-ouest de l'Alaska. Ces échantillons correspondent à des arbres sur pied et des bois provenant de maisons historiques en rondins.

Les échantillons ont été mesurés avec une table de mesure Velmex et le logiciel *Measure J2X* à l'échelle 0,001 mm. Le signal dendrochronologique a été examiné grâce à des méthodes dendrochronologiques traditionnelles appliquées à des mesures brutes de largeurs de cernes. La datation croisée a été effectuée à l'aide du logiciel TSAPWIN avec comme principal indicateur statistique, le *Cross-Date Index* (CDI), qui permet d'évaluer la force de corrélation entre les séries dendrochronologiques, et donc la nature et la qualité du signal dendrochronologique. Les années caractéristiques ont été calculées d'après la méthode de Becker à l'aide du package *Pointer* sur l'environnement *R*. La fréquence d'un cerne particulier sur un corpus donné est calculée afin de mettre en avant des années clefs de croissance qui correspondent à des événements (climatiques) extrêmes et qui servent de repères dans la datation croisée. Cela nous a permis d'analyser et de caractériser la variabilité spatio-temporelle du signal dendrochronologique à une échelle multi-scalaire (intra-site, inter-site et régionale) et de définir des régions de croissance afin d'obtenir une vision plus précise du signal dendrochronologique.

Résultats préliminaires

Le corpus de données à notre disposition est caractérisé par des échantillons d'épicéas d'arbres matures. Une partie des échantillons est fragmentée mais plus de 70% du corpus possède le dernier cerne de croissance, permettant plus aisément la datation croisée. Si le nombre de bois qui participent aux périodes anciennes reste plus faible que pour les périodes récentes, il augmente néanmoins de façon conséquente le nombre d'échantillons en comparaison avec les séquences de référence existantes.

À l'échelle du nord-ouest de l'Alaska, la datation croisée montre un signal dendrochronologique robuste entre les sites proches géographiquement et a permis d'identifier dix ensembles. La force du signal dendrochronologique entre ces ensembles nous permet de les regrouper en deux principaux groupes, sur la base de leur proximité géographique. Ceux-ci suivent une tendance de croissance dynamique, en dents-de-scie, et une tendance de croissance plus stable, où l'amplitude des variations annuelles est moins marquée. Ces deux groupes correspondent à une manifestation latitudinale du signal de croissance et à une manifestation longitudinale. Par ailleurs, il a été possible d'observer la présence d'années caractéristiques de croissance à l'échelle locale (1758, 1902, 1924 et 1932) et à l'échelle régionale. L'analyse des années caractéristiques permet d'expliquer la présence de certains pics de croissance, favorables (cerne large) ou défavorables (cerne très fin).

Le signal dendrochronologique étant robuste et cohérent entre 1520 et 1941 à l'échelle du nord-ouest de l'Alaska, nous avons produit une séquence dendrochronologique régionale qui montre une tendance de croissance à la hausse entre le XVIIème siècle et le début du XIXème siècle, suivie par une baisse puis une légère remontée de la croissance à partir des années 1920.

Discussion

La mise en évidence d'ensembles nous permet d'observer des signatures locales du signal dendrochronologique, c'est-à-dire des tendances de croissance auxquelles il est possible de rattacher précisément les bois flottés originaires de la région. La tendance de croissance stable suit un gradient latitudinal, déjà observé par Giddings (1941), où le signal dendrochronologique est particulièrement fort, où les ensembles montrent une très grande proximité. Ce gradient latitudinal correspond à la ligne des arbres, c'est-à-dire à la limite de croissance la plus extrême des *Picea glauca* de la forêt boréale. La seconde tendance de croissance, dynamique, suit un gradient longitudinal d'ouest en est, le long du fleuve Kobuk où l'on passe progressivement d'une influence maritime à un climat continental. Le signal dendrochronologique faiblit alors progressivement d'ouest en est, c'est-à-dire que la force de corrélation entre les ensembles est moins importante d'un milieu à un autre, où les conditions de croissance ne sont pas exactement les mêmes. Néanmoins, ces deux gradients correspondent à deux manifestations locales d'une même tendance de croissance régionale exprimée par un signal de qualité. Nos résultats renforcent et valident les travaux de Giddings : les arbres concernés par une même zone de températures - principal facteur influençant la croissance des épicéas en Alaska qui réagissent positivement à une hausse des températures - du mois de juillet (saison de croissance) se corrèlent très bien entre eux, et intègrent de manière similaire les variations climatiques annuelles (Barber *et al.* 2000; Giddings 1943, 1952; Juday *et al.* 2015).

Les années caractéristiques identifiées à l'échelle locale peuvent correspondre à des phénomènes environnementaux et climatiques locaux. Les années caractéristiques régionales, de leur côté, peuvent être associées à la chute ou l'augmentation des températures à une échelle plus régionale. Certaines années défavorables peuvent être associées à des éruptions volcaniques qui ont pour conséquence un refroidissement des températures. Les principales éruptions connues marquées par une anomalie de croissance sont 1783, 1817 et 1912. De son côté, l'année 1809, marquée par un cerne fin, est connue dans les moraines comme un événement froid. De même, l'année 1899, également repérable par un cerne fin dans les arbres européens, est visible dans les épicéas alaskiens mais n'est à ce jour pas encore expliquée.

À partir de la fin du XVIIème siècle (où le nombre de tarières dépasse cinquante), il est possible d'observer sur la séquence régionale des variations de la croissance que l'on peut associer aux variations de température du Petit âge glaciaire. Avec l'augmentation progressive des températures postérieure au Petit âge glaciaire, nous pouvons, à partir de 50 échantillons entiers, observer une tendance à l'augmentation de la croissance radiale. Celle-ci peut potentiellement être liée à la hausse progressive des températures dans les périodes récentes et, donc, à un climat plus favorable à la croissance des épicéas dans la région.

Conclusion et Perspectives

Dans les années 1940, Giddings a su constituer un assemblage de données contenant un fort potentiel dendrochronologique et dendroclimatique. Aux séquences dendrochronologiques qu'il a publiées, la mesure et la multiplication des données modernes apportent une résolution nouvelle pour la seconde moitié du dernier millénaire dans le nord-ouest de l'Alaska

témoignant du potentiel de cette collection historique pour les études dendro-archéologiques de la région.

La présence de signatures de croissance et d'années caractéristiques locales suggère ainsi des variations du micro-environnement qui vont faciliter l'étude de la dendro-provenance des bois flottés archéologiques. Cette précision régionale du signal apportée par les nombreux échantillons autrefois inexploités est essentielle pour retrouver l'origine des bois utilisés par les groupes humains sur le littoral alaskien et donc pour la datation des sites archéologiques côtiers du nord-ouest de l'Alaska.

Dans le nord-ouest de l'Alaska, où la résolution des autres proxies climatiques et chronologiques est encpeu développée, cette collection a un grand potentiel pour améliorer notre compréhension de l'environnement du nord-ouest de l'Alaska à travers l'analyse du bois flotté (Alix 2005; Giddings 1952; Hellmann *et al.* 2013) et la mise en place de séquences dendrochronologiques localisées et datées. Finalement, ces échantillons offrent la possibilité unique d'obtenir des reconstructions climatiques précises et fiables pour une période durant laquelle s'observent d'importants changements culturels. En revisitant la séquence millénaire de Giddings à l'aide d'un échantillonnage plus large et de techniques et outils statistiques plus performants, il sera possible de construire des séquences climatiques et environnementales plus robustes avec un fort degré de résolution spatio-temporelle. Ces séquences robustes permettront de replacer les dynamiques de populations du début du IIème millénaire dans un cadre climatique et chronologique à résolution annuelle et de confronter ces dynamiques de populations et leur culture matérielle aux changements environnementaux.

Bibliographie

Alix, C. 2005. « Deciphering the impact of change on the driftwood cycle: contribution to the study of human use of wood in the Arctic ». Global and Planetary Change 47: 83‑ 98.

———. 2016. « A critical Resource : Wood Use and Technology in the North American Arctic ». In The Oxford Handbook of the Prehistoric Arcti, ed. O. K. Mason et T. M. Friesen, 109‑ 29.

Barber, V. A., G. P. Juday, et B. P. Finney. 2000. « Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress ». Nature 405 (6787): 668‑ 73.

Giddings, J.-L. 1941. Dendrochronology in Northern Alaska. Laboratory of Tree-Ring Research Bulletin 1. University of Arizona Bulletin, 7 (4).

———. 1943. « A plan for mapping Arctic Sea Currents ». Geographical Review 33: 326‑ 27.

———. 1952. The Arctic Woodland Culture and the Kobuk River. Univ. of Pennsylvania. Vol. 8. Univ. Museum Monograph.

Hellmann, L., W. Tegel, O. Eggerstsson, F. H. Schweingruber, R. Blanchette, A. Kirdyanov, H. Gärtner, et U. Büntgen. 2013. « Tracing the origin of Arctic driftwood ». Journal of Geophysical Research : Biogeosciences 118: 1‑ 9.

Juday, G. P., Claire Alix, et T. A. Grant. 2015. « Spatial coherence and change of opposite white spruce temperature sensitivities on floodplains in Alaska confirms early-stage boreal biome shift ». Forest Ecology and Management 350: 46‑ 61.

Nash, S. 2000. « James Louis Giddings' archaeological tree-ring dating in the American Arctic: A forgotten legacy ». Arctic Anthropology 37: 60‑ 78.

Poster C12

Analyse numérique du comportement thermique de poutres hybrides bois-acier en situation d'incendie

BÉREYZIAT Antoine[1], AUDEBERT Maxime[1], DURIF Sébastien[2]

[1]Université de Lyon, École Nationale d'Ingénieur de Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), UMR 5513, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne, Cedex 2, France.
[2]Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France. CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France.
antoine.bereyziat@enise.fr

Mots clefs : poutre hybride bois-acier ; résistance au feu ; comportement thermo-hydrique.

Contexte et objectifs

L'utilisation du bois dans la construction présente de nombreux avantages : le bois est une ressource renouvelable, un matériau environnementalement performant, léger, qui se met en œuvre rapidement et par voie sèche ; c'est un matériau recherché pour son aspect esthétique et la sensation de bien-être qu'il inspire aux usagers des bâtiments. Dans cette perspective, il paraît donc judicieux d'œuvrer au développement de l'utilisation du bois dans la construction et de lui ouvrir de nouveaux champs d'application. Le développement des solutions de construction mixtes apparaît comme un axe incontournable pour atteindre ces objectifs, en particulier en ce qui concerne la construction de bâtiments de grande hauteur en bois. La mixité du bois et du béton est désormais bien référencée et fait l'objet d'applications industrielles, en revanche la mixité du bois et du métal reste peu documentée. La présente étude explore les possibilités que peuvent offrir des éléments de structure mixtes bois-acier, notamment en ce qui concerne le comportement au feu qui constitue un aspect critique.

Les profilés hybrides bois-acier peuvent être utilisés pour diverses raisons : jonction d'une ossature en bois avec une ossature en acier, renforcement mécanique, protection au feu de l'acier par le bois, réduction des dimensions de la section par rapport à une membrure en bois équivalente, renforcement des profilés métalliques vis-à-vis du voilement local, esthétique… Plusieurs solutions existent pour la réalisation d'éléments hybrides acier-bois, l'une des plus anciennes étant la Flitch-beam (Alam, 2012). C'est une poutre constituée de deux éléments en bois assemblés de part et d'autre d'une plaque métallique qui rigidifie l'ensemble. Un autre moyen d'assembler l'acier et le bois dans des éléments hybrides consiste à insérer des armatures métalliques dans des membrures en bois, la liaison étant assurée au moyen d'une résine époxy (Piazza, 2016). Winter *et al.* (Winter, 2016) ont étudié des profilés métalliques minces formés à froid, assemblés en forme de « I » et encapsulés dans du bois. Ils ont montré que de tels éléments pouvaient être performants sur les points suivants : coût, facilité de montage, dimensions des sections, résistance au séisme, sécurité incendie, comportement mécanique. Jurkiewiez *et al.* (Jurkiewiez, 2017) ont réalisé des essais de flexion trois points sur des poutres bois-acier d'une longueur de 3 mètres, constituées de profilés métallique en « I » ou en « T », ainsi que d'éléments latéraux en bois assemblés par des boulons et des vis. Cette étude préliminaire a montré que la combinaison du bois et de l'acier retarde l'apparition d'instabilités dans les profilés métalliques. La présente étude s'inscrit dans la continuité des travaux de Jurkiewiez *et al.* et vise à étudier le comportement thermique en cas d'incendie de poutres en acier en forme de « I » ou de « T » associées à du bois (Fig. 1).

Modélisation

Trois configurations hybrides basées sur un profilé en acier IPE 300 ont été retenues pour l'étude (Fig. 1). La première est constituée d'un profilé métallique en « I » dit « partiellement encapsulé », la deuxième est similaire mais le profilé métallique est en « T ». La dernière présente un profilé en « I » dit « complètement encapsulé ».

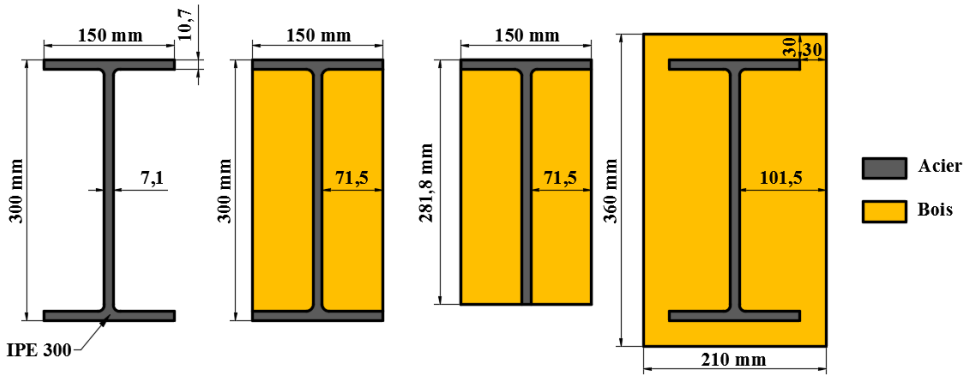


Fig. 1 : Géométries modélisées

Le comportement thermique de ces configurations a été étudié sur la base d'une simulation numérique 2D employant la méthode des éléments finis, réalisée à partir du code de calcul MSC MARC (MSC Software Corporation, 2014). Les inconnues du problème numérique sont les températures régnant dans la section droite des différentes configurations, seule l'équation de la chaleur est utilisée pour le résoudre. Les propriétés thermo-physiques retenues pour la modélisation de l'acier sont celles proposées par l'EN 1993-1-2 (CEN, 2005). La modélisation du matériau bois s'appuie sur des propriétés issues de la littérature (Audebert, 2011) et tient compte des transferts hydriques qui interviennent dans le bois en cas d'incendie. En effet, la combustion du bois induit l'évaporation de l'eau qu'il contient. Une partie de cette vapeur s'échappe tandis que le reste migre à l'intérieur de la section pour se recondenser en zone froide (Samaké, 2014). Cette migration conduit à une accumulation d'eau contre la paroi imperméable du profilé métallique qui est alors refroidi jusqu'à ce que la totalité de cette eau soit évaporée. Ces transferts de masse sont compliqués à modéliser, c'est pourquoi ce phénomène est simulé numériquement dans son état final, après la migration de l'eau qui ne s'est pas échappée, et son accumulation contre la paroi du profilé métallique. L'influence de cette eau a été modélisée en faisant varier les propriétés thermo-physique du bois (chaleur volumique) en fonction de la température et de la distance par rapport à la paroi du profilé métallique.

Dans l'analyse numérique, les différentes configurations sont exposées pendant 60 minutes à un feu ISO 834 recommandé par l'EN 1991-1-2 (CEN, 2003). L'analyse numérique a été utilisée pour évaluer l'influence de divers facteurs, tels que la géométrie, le nombre de côtés exposés au feu, ou la façon de modéliser les matériaux et les transferts hydriques.

Résultats

La figure 2 présente les évolutions de la température moyenne de la section d'acier en fonction de la configuration étudiée. Il a été considéré que seule la face inférieure et les faces latérales sont exposées au feu, ce qui peut correspondre à la réalité d'une poutre soutenant un plancher. Les résultats prennent en compte une accumulation d'eau à l'interface acier-bois, provoquée par l'évaporation de l'eau contenue dans le bois sous l'effet du feu. Les propriétés des matériaux sont les mêmes pour toutes les configurations (acier selon l'EN 1993-1-2 et bois selon (Audebert, 2011)).

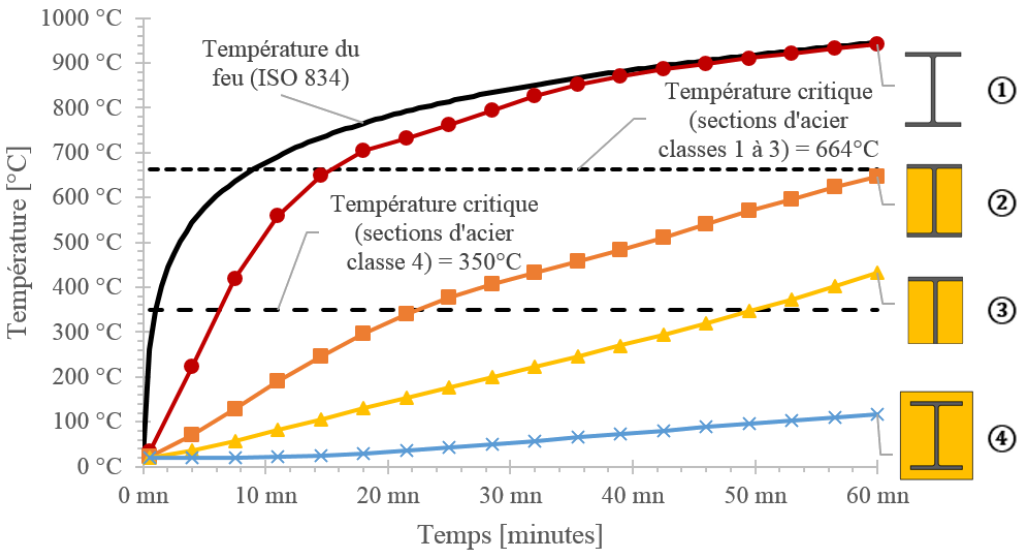


Fig. 2 : Température moyenne du profilé métallique en fonction du temps et de la configuration considérée

Les résultats montrent qu'un profilé IPE 300 complètement encapsulé présente un excellent comportement thermique en cas d'incendie, même si l'épaisseur de bois est faible (30 mm). Les profilés partiellement encapsulés sont moins performants mais permettent de limiter l'échauffement de l'acier. En effet, l'écart entre les températures moyennes des profilés en acier des configurations ① et ② vaut 293 °C au bout d'une heure (Fig. 2).

Dans l'EN 1993-1-2 est présentée la notion de « température critique » qui est définie de la façon suivante : « Pour un niveau de chargement donné, température à laquelle la ruine [d'un élément de construction en acier] est susceptible de se produire […] pour un champ de température uniforme » (CEN, 2005). Pour les sections d'acier de classe 4, cette température critique vaut 350°C. Pour les autres classes de sections, elle vaut 664°C si l'on considère un taux de chargement de 30% en cas d'incendie. Dans cette étude, les durées nécessaires pour atteindre ces températures critiques ont été utilisées comme critères permettant de quantifier la performance des configurations étudiées (Figure 3).

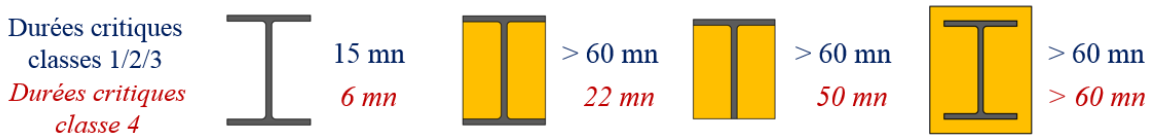


Fig. 3 : Durée nécessaire pour atteindre la température critique de l'acier pour chaque configuration

Ces résultats peuvent être nuancés dans la mesure où le concept de température critique défini par l'EN 1993-1-2 est basé sur l'hypothèse selon laquelle la température est uniforme dans le profilé métallique. Or la simulation numérique a montré qu'il peut exister un écart de températures important (jusqu'à 200°C) entre les semelles et l'âme du profilé métallique en « I » partiellement encapsulé. Cependant, même en considérant le critère donné pour les sections de classe 4, qui est le plus sévère, on constate que tous les profilés mixtes acier-bois étudiés présentent un comportement thermique intéressant, si on les compare à un profilé métallique sans protection. En outre, le bois renforce les parois métalliques vis-à-vis des instabilités locales et globales, un reclassement des sections d'acier de classe 4 vers les classes de sections supérieures est alors possible, ce qui permet de considérer une température critique de l'acier plus importante et un comportement thermique amélioré.

Conclusion et perspectives

Cette étude présente des résultats sur le comportement thermique des poutres hybrides bois-acier en situation d'incendie. Elle montre également le potentiel de ces poutres hybrides en termes de résistance au feu. En effet, bien que le bois soit un matériau combustible, une épaisseur de bois suffisante peut être utilisée comme protection anti-feu pour les poutres en acier. L'avantage du bois est sa capacité à fournir à la fois une protection incendie importante et un support mécanique à l'acier vis-à-vis des instabilités, tandis que sa légèreté n'augmente pas significativement le poids de la poutre. De plus, pour une même charge, l'utilisation d'éléments hybrides bois-acier plutôt que d'éléments en bois permet d'optimiser les dimensions de la section transversale de la poutre. Une analyse numérique thermomécanique et une analyse thermique expérimentale sont en cours pour valider et compléter la simulation numérique thermique proposée dans cette étude.

Remerciements

Les auteurs remercient le Tremplin Carnot MECD pour son soutien financier (Projet MiBAPro).

Références

Alam P., Ansell M., Smedley D. (2012) « Effects of reinforcement geometry on strength and stiffness in adhesively bonded steel-timber flexural beams », Buildings, vol. 2, p. 231–244.

Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A. (2011) « Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire », Engineering Structures, vol. 33, n° 12, p. 3257-3268.

Comité Européen de Normalisation (2003) Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu, EN 1991-1-2.

Comité Européen de Normalisation (2005) Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : règles générales - calcul du comportement au feu, EN 1993-1-2.

Jurkiewiez B., Durif S., Bouchaïr A. (2017) « Behaviour of steel-timber beam in bending », Eurosteel 2017, Copenhague (Danemark), 9 pages.

MSC.Software Corporation (2014) MSC MARC, User’s Manual, vol. A: theory and user information.

Piazza M. (2016) « Optimization process in the use of wood and wood-based materials in hybrid and composite structures », World Conference on Timber Engineering WCTE 2016, Vienne (Autriche), 10 pages.

Samaké A., Taazount M., Audebert P., Palmili P. (2014) « Thermo-hydric transfer within timber connections under fire exposure: Experimental and numerical investigations », Applied Thermal Engineering, vol. 63, n° 1, p. 254-265.

Winter W., Tavoussi K., Parada F.R., Bradley A. (2016) « Timber-steel hybrid beams for multi-storey buildings: Final report », World Conference on Timber Engineering WCTE 2016, Vienne (Autriche), 10 pages.

Poster C13

Sur la fissuration du bois vert par modélisation numérique et microtomographie à rayons X

MAMBILI LEBONGUI Germice Jordy[1,3], MOUTOU PITTI Rostand[1,3], BADEL Eric[2], GRIL Joseph[1,2], TOUSSAINT Evenlyne[1]

[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont Ferrand, France
[2]Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont–Ferrand, France,
[3]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
[4]Université des Sciences et Techniques de Masuku, EPM, Franceville, Gabon
rostand.moutou_pitti@uca.fr

Mots clefs : Bois vert, fissuration, éléments finis, microtomographie à rayons X

Contexte et objectifs

Dans ses utilisations comme élément de structure, le bois est généralement usiné et mis en œuvre après séchage. L'utilisation de bois encore vert (jamais séché en dessous du point de saturation des fibres) permettrait de réduire les coûts d'exploitation en réduisant le temps et les traitements nécessaires au séchage du bois. Toutefois, la maturation cellulaire ainsi que le retrait accompagnant le séchage ultérieur, du fait des précontraintes que ces phénomènes induisent dans le matériau, conduisent à des déformations mais également à l'apparition de fissures dans les pièces de bois. Ces effets sont considérablement amplifiés en cas de présence du bois de réaction (Gardiner et al 2014). L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement à la rupture, à l'état vert et au cours du premier séchage, de divers types de bois. Afin de prendre en compte la géométrie réelle du front de fissure dans l'analyse des résultats, il est prévu d'utiliser des techniques innovantes de type microtomographie à rayons X (µCT).

Matériel et méthodes

Un sapin (*Abies alba*) de diamètre (sur écorce et à hauteur de poitrine) 80 cm et hauteur 19 m et un peuplier (*Populus nigra*) de diamètre 115 cm et hauteur 28 m, présentant chacun une forte inclinaison à la base, ont été choisis pour l'étude. Après vérification de la présence de bois de réaction au moyen de mesures périphériques des déformations résiduelles, les arbres ont été abattus en juillet 2018 et débité en billons (Fig. 1a) puis en planches (Fig. 1b) dans les zones identifiées comme du bois normal ou de réaction sur la section transversale.

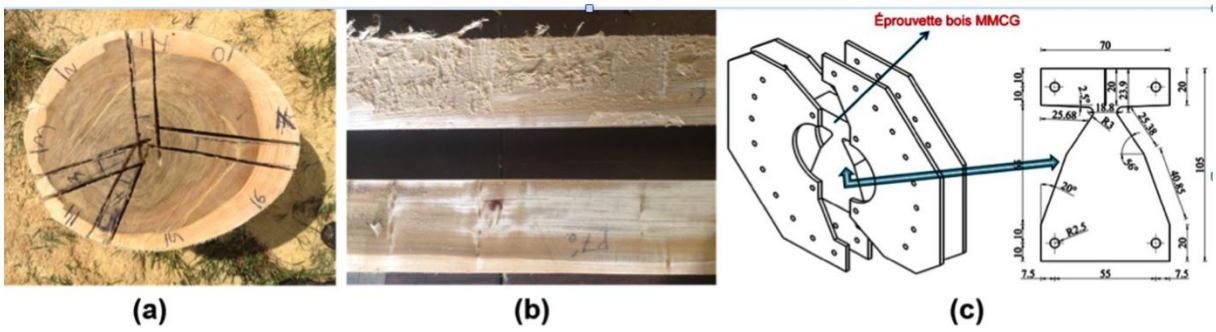


Fig. 1 : (a) Lieu de prélevements des échantillons du bois vert sur la grume; (b) Poutrelles extraites ; (c) Essais mécaniques via l'éprouvette MMCG

Dans le cas du peuplier, la bille de pied étant creuse, seule la partie située au delà de 5 m de hauteur, correspondant à une branche maîtresse ayant pris le relai du tronc, a été utilisée. Après stockage durant 2 mois dans une chambre froide, enveloppées dans de la cellophane et des chiffons humides, les planches ont été usinées sous forme d'éprouvettes de fissuration de type Mixed-Mode Crack Growth (MMCG) (Moutou Pitti et al. 2010). Cette éprouvette permet d'obtenir conjointement une propagation de fissure en mode I, II et mixte. Le montage MMCG est constitué de l'éprouvette en bois et d'un système d'acier Arcan, Fig. 1c. L'ensemble est placé dans une presse électromécanique afin de mesurer l'avancée de la fissure surfacique en mode d'ouverture par corrélation d'image numérique.

Afin de suivre l'évolution du front de fissure lors des phases de propagation, une technique d'imagerie 3D très prometteuse ou microtomographie à rayons X (µCT) (Hamdi et al. 2015) sera utilisée. Les coupes transversales consécutives reconstruites fournissent une visualisation 3D à haute résolution du volume étudié ; cela permet ainsi des mesures morphologiques des paramètres de la microstructure telle que la porosité, la surface effective ou le diamètre de la fibre dans un matériau hétérogène. Dans ce travail, les résultats de suivi tridimensionnel du front de fissure seront validés par analyse d'image.

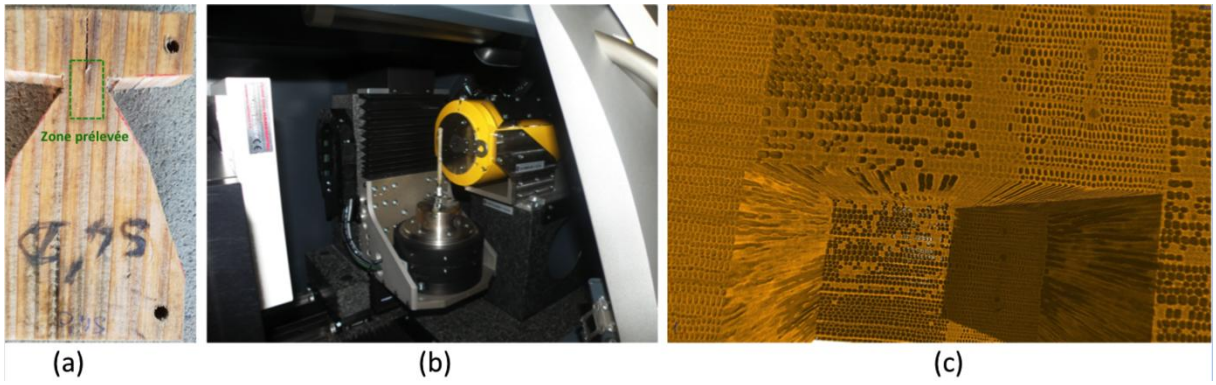


Fig. 2 : (a) Eprouvette en bois de sapin ; (b) Microtomographe à Rayons X ; (c) Volume 3D de la région d'intérêt et traitement d'image (Dalla-Salda et al. 2015).

La Fig. 2 présente le protocole d'analyse d'image par µCT. Afin de suivre le processus de croissance des fissures dans l'échantillon de bois vert, la µCT est utilisée pour obtenir des images 3D du bois autour de la pointe de la fissure. Le calcul expérimental des taux de restitution d'énergie pour différentes longueurs de fissure, sur les faces extérieures et perpendiculaires à la direction de propagation de la fissure, permettra la validation des résultats obtenus par modélisation numérique. En perspective, une analyse statique des champs de déformations de l'éprouvette MMCG à la pointe de la fissure sera conduite via une modélisation sous le logiciel Ansys. Pour la modélisation, un maillage adaptatif fin de 1 mm de dimension sera choisi avec des conditions limites réalistes. A terme, le taux de restitution d'énergie obtenu en mode d'ouverture de fissure sera comparé à celui mesuré via la technique µCT et la corrélation d'images.

Remerciements

Les auteurs souhaitent vivement remercier le CNRS pour son soutien financier à ce travail dans le cadre du projet PEPS « ingénierie verte » RUMO, Seif Eddine Hamdi pour sa contribution à l'élaboration du projet, Joseph Gril pour la mise à disposition de son peuplier et Ludovic Martin pour celle de son sapin.

Références

Hamdi S.E., Delisée C., Malvestio J., Da Silva N., Le Duc A., Beaugrand J. (2015) X-ray computed microtomography and 2D image analysis for morphological characterization of short lignocellulosic fibers raw materials: A benchmark survey, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 76,1-9.

Moutou Pitti R., Dubois F., Octavian P. (2011) A proposed mixed-mode fracture for wood under creep loadings. International Journal of Fract. 167(2), 195-205.

Schniewind A.P., Pozniak, R.A. (1971) On the fracture toughness of Douglas fir wood, Engineering Fracture Mechanic, 2(3), 223–230.

Dalla-Salda G., Fernández M.E., Sergent A.S., Rozenberg P., Badel E. and 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

Poster C14

Etude comparative du comportement hydromécanique en compression cyclique de trois essences tropicales

ENGONGA EDZANG Arnauld Clauvy's[1], PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman[1, 2], MOUTOU PITTI Rostand[2, 3]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon.
[2]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Clermont-Ferrand, France.
[3]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon.
mredzang@gmail.com

Mots clefs : Iroko ; Okoumé ; Padouk ; Bois tropical ; Impact humidité interne

Contexte et objectifs

Au Gabon, la forêt représente plus de 80% du territoire nationale, ce qui fait plus de 22 millions d'hectares de potentiel forestier, donc une p-value importante pour le domaine de la construction bois. Aussi, avec plus de 1900 mm de précipitation annuelle, un taux d'Humidité Relatif (HR) proche de 85% et une Température (T) moyenne de 27°C, les conditions environnementales au Gabon paraissent rudes pour les structures en bois (Pambou Nziengui et al. 2017; Tran et al. 2018). En effet, la littérature montre que les variations des conditions climatiques (HR, T) mais surtout de l'Humidité Interne (HI) du bois, couplées aux chargements limitent la durée de vie des structures en bois (Pambou Nziengui et al. 2017). Ce travail aborde, l'étude de l'impact couplé des variations de l'humidité interne du bois et du chargement en compression cyclique sur le comportement mécanique de trois essences tropicales (Iroko, Okoumé et Padouk). L'objectif de la présente étude est de proposer un modèle expérimental comparatif du chargement en compression cyclique du *Milicia excelsa* (Iroko), de *l'Aucoumea klaineana Pierre* (Okoumé) et du *Pterocarpus Soyauxii* (Padouk), à différents taux d'humidité interne.

Matériel et Méthodes

Le dispositif expérimental est composé : d'éprouvettes d'Iroko (I), d'Okoumé (O) et de Padouk (P) de dimension 20×20×60 mm^3 obtenues conformement à la norme NF EN 408 (figure 1a); d'une presse united testing systems machine équipé d'un système d'acquisition de données et d'un extensomètre model 3542-025M-020-ST, pour mesurer les déformations pendant l'essai (figure 1b, 1c et 1d). Les éprouvettes ont été soumises à 5 cycles de charge-decharge, avec une force maximale de 1640 N prise à 10% de la force maximale à la rupture de O.

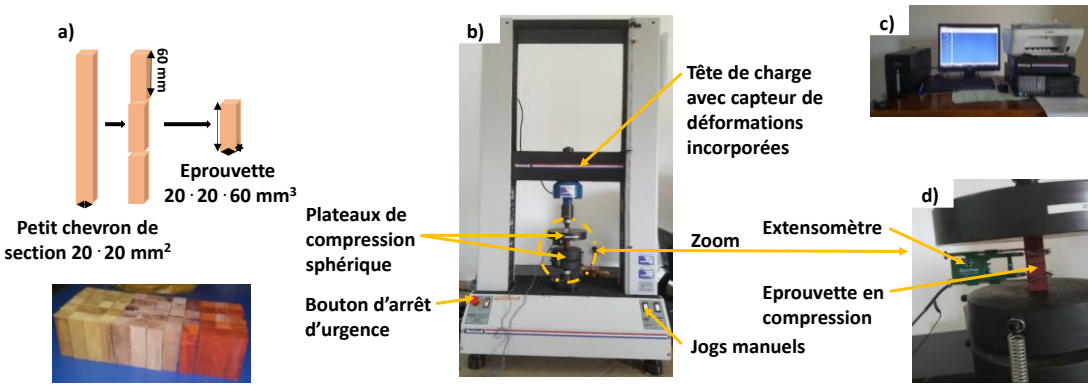


Fig. 1 : Montage expérimental d'un essai de compression: (a) configuration géométrique générale des éprouvettes testées ; (b) banc d'essai ; (c) système d'acquisition de données ; (d) essai de compression d'une éprouvette

Résultats

Les figures 2a, 2b et 2c montrent respectivement : les évolutions de l'amplitude des déformations de chaque cycle dans un état sec (10% HI), hygroscopique (25% HI) et saturé (60% HI) des échantillons d'Iroko, d'Okoumé et de Padouk. Entre le premier et le cinquième cycle de chargement, l'amplitude des déformations diminue de 0,11%, 0,10% et 0,05% respectivement chez l'Okoumé, l'Iroko et le Padouk à 10% d'HI. A 25% d'HI, elle diminue de 0,16%, 0,12% et 0,08% respectivement chez l'Okoumé, l'Iroko et le Padouk. Enfin à 60% d'HI, elle diminue de 0,08% chez l'Okoumé et l'Iroko, de 0,06% chez le Padouk.

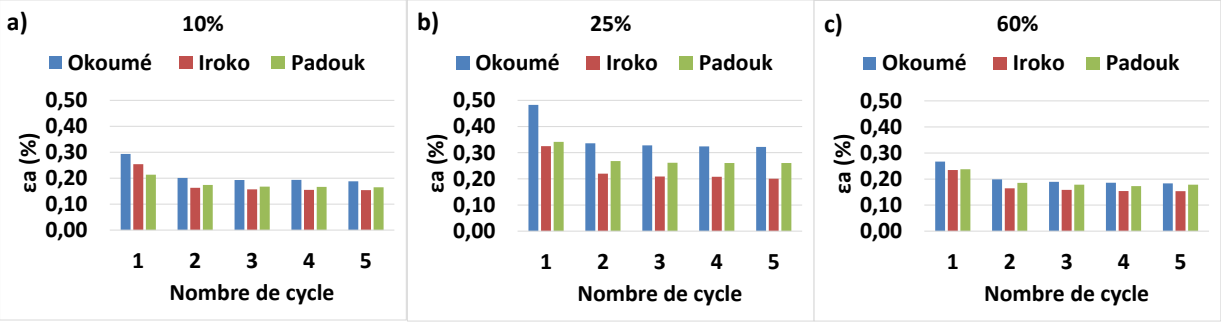


Fig. 2 : Comparaison des amplitudes de déformations des cinq cycles de chargement sur l'Iroko, l'Okoumé et le Padouk

Conclusion et Perspectives

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence, sous la base d'une étude comparative, l'impact du chargement cyclique couplé aux variations de l'humidité interne, sur le comportement mécanique de 3 essences tropicales. Les résultats obtenus montrent que l'amplitude des déformations, après le premier cycle, diminue avec le nombre des cycles de charges, jusqu'à atteindre des valeurs pour lesquelles la déformation est quasi stationnaire. Le comportement observé est identique pour les 3 essences et présente des déformations plus importantes chez les essences les moins denses (O et I respectivement) à 10% de HI. Par contre à partir de 25% de HI, ces tendances sont inversées. Les amplitudes de déformation deviennent plus importantes respectivement, chez O, P et I. Le P étant une essence à PSF faible 21% (Gérard et al. 2004) par rapport à I et O, qui sont respectivement à PSF moyen 25% et fort 40% , cela pourrait expliquer le changement de comportement observé entre le comportement de I et P à partir de 25% de HI.

Remerciements

Les auteurs remercient le Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale de l'Afrique Centrale (RIFFEAC) pour la mise en place du Master Science du bois de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF).

Références

Gérard J., Beauchêne J., Fouquet D., Guibal D., Langbour P., Thévenon M-F., Thibaut A., Vernay M. (2004) Caractéristiques technologiques de 215 essences tropicales. Montpellier : CIRAD-Forêt, 1 Cd-Rom.

Pambou Nziengui C.F., Ikogou S., Moutou Pitti R. (2017) Impact of cyclic compressive loading and moisture content on the mechanical behavior of Aucoumea Klaineana Pierre. Wood Material Science and Engineering, 13, 190-196.

Tran T-B., Bastidas-Arteagaa E., Aoues Y., Pambou Nziengui C.F., Hamdi S.E., Moutou Pitti R., Fournely E., Schoefs F. & Chateauneuf A. (2018) Reliability assessment and updating of

notched timber components subjected to environmental and mechanical loading. Engineering Structures, 166, 107-116.

Poster C15

Caractérisation mécanique in situ de quelques essences tropicales pour la réalisation de poutres en BMR.

NDONG BIDZO Cédrick Horphé[1], MOUTOU PITTI Rostand[2, 3], IKOGOU Samuel[4], BEAT Kaiser[5]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon.
[2]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont-Ferrand, France
[3]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon.
[4]Ecole Polytechnique de Masuku (EPM), Franceville, Gabon.
[5]ECOWOOD SA, Z.I Acaé, Lbreville, Gabon.
ndonghorphe@gmail.com

Mots clefs : *Staudtia kamerunesis*, *Dacryodes buettneri*, module d'élasticité longitudinal, module de rupture, bois massif reconstitués (BMR).

Contexte et objectifs

Au Gabon, la forêt s'étend sur plus de 80% de sa superficie et compte plus de 400 essences de bois potentiellement exploitables. Mais seulement une poignée d'entre elles sont exploitées, comme exemple ; *Aucoumea klaineana* (Okoumé), essence exploitée depuis près d'un siècle. L'appauvrissement de ses peuplements et la diversification des marchés poussent également les gestionnaires forestiers à considérer de nouvelles espèces (Meunier et al. 2015). Il devient important de mieux connaitre le potentiel d'essences jusque-là marginales et de maitriser les propriétés technologiques de leur bois.

L'objectif de cette étude est donc de déterminer les caractéristiques mécaniques in situ de deux essences tropicales correctement choisies, mais aussi de tester les poutrelles reconstituées par collage de ces différents bois. Le but général est d'identifier les bonnes combinaisons des différents joints de colles pour la confection de poutres en bois massif reconstitués (BMR) en usage structural.

Matériel et Méthodes

Le choix de la ressource ligneuse a été fait sur une base de 40 essences ayant une bonne aptitude au collage selon le Tropix 7. (CIRAD, 2011). A l'issue d'une analyse multicritère deux essences ont été retenues (Tableau 1), des *poutrelles Staudtia kamerunesis* (Niové) et *Dacryodes buettneri* (Ozigo) dimensionnées selon la norme NF EN 408 (figure 1a) ont été testées sur un banc d'essai de flexion 3 points « United testing systems machine » équipé d'une cellule de charge maximale de 100 KN (figure 1b).

Tab.1 : Analyse multicritère

Essence	Disponibilité (m^3/ans)	Taux de consommation (%)	MOR en flexion (MPa)	Classe d'emploi	Note pondérée sur 68
Ozigo	170 721,5	0	91±11	2	50
Niové	206 098,1	1,29	151±23	4	58

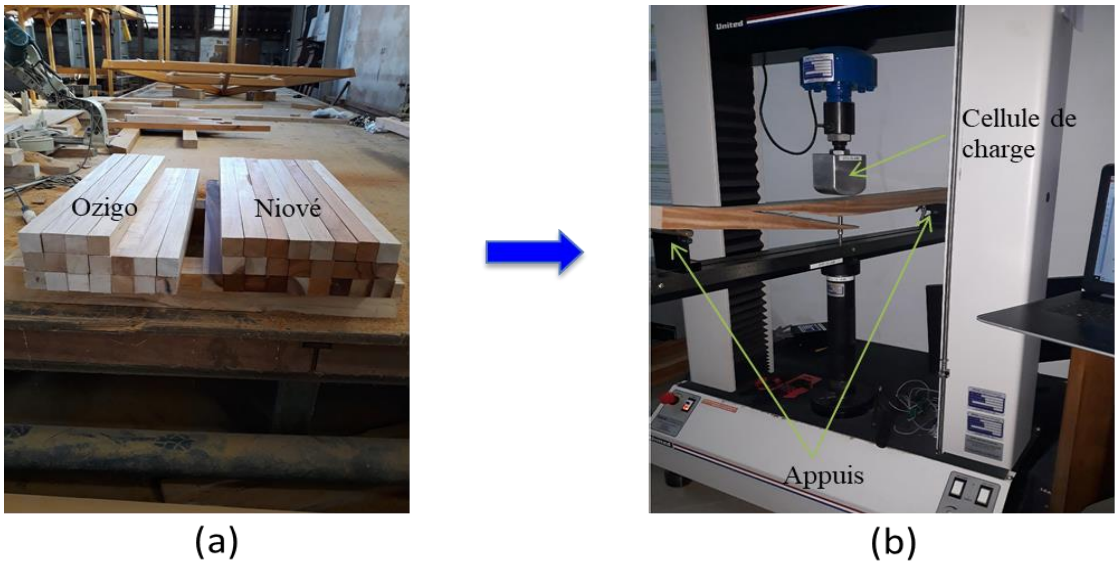


Fig.1 : Poutrelles de 45*45*850 mm^3 (a), poutrelle de Niové chargé jusqu'à rupture

Premier résultat

Durant les essais, les poutrelles sont chargées selon deux phases, à savoir un cycle dans la zone élastique puis un chargement jusqu'à la rupture. La figure 2 montre les courbes force-flèche d'une poutrelle de Niové et d'Ozigo pendant les phases de charges. Le tableau 2 montre les valeurs des modules de rupture et d'élasticité des essais effectués.

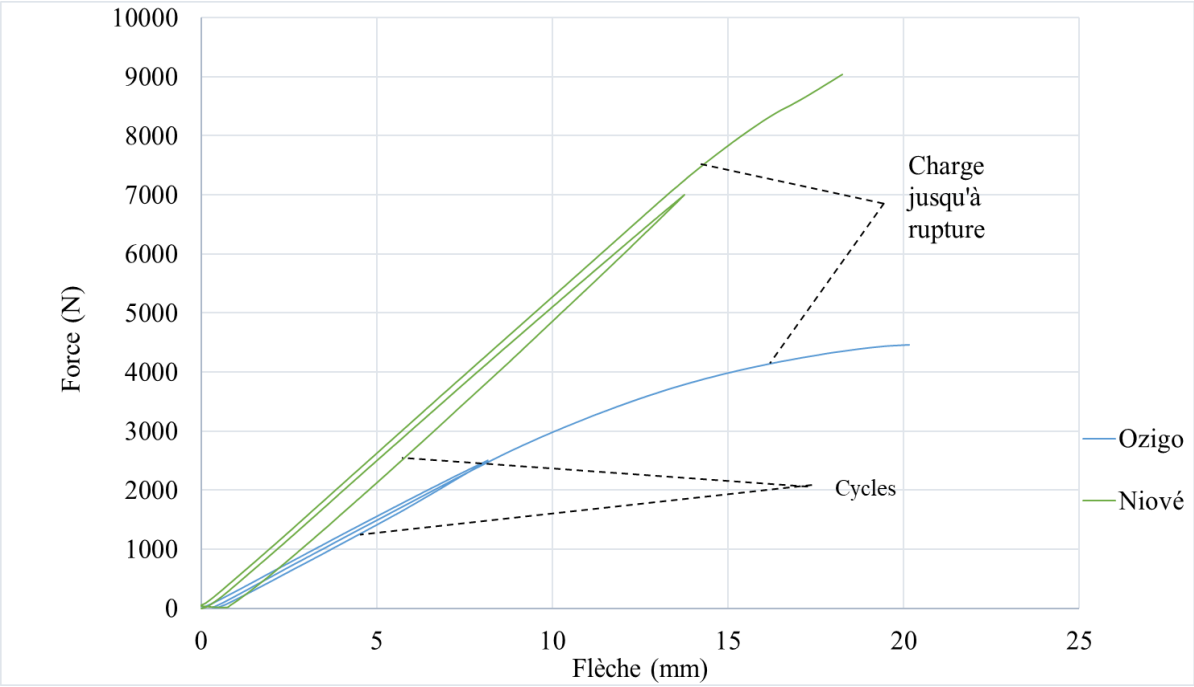


Fig. 2 : Courbe force-flèche de Niové et Ozigo.

La figure 2 et le tableau 2 montrent qu'il y a une légère rigidification des éprouvettes après les premières phases de chargement, mais aussi que pour les essais effectués, le module de rupture de *Dacryodes buettneri* est inférieur à la valeur indiquée par le CIRAD. Le module de rupture et d'élasticité longitudinales ont été déterminés respectivement avec la formule (1) (NF EN 408), où L est la distance entre les appuis, (F_2-F_1) et (W_2-W_1) les variations respectives de la force et la flèche dans le domaine élastique, I_z le moment quadratique, h l'épaisseur et b la largeur.

$$\sigma_{max} = \frac{3F_{max}L}{2bh^2} \; ; \qquad E_l = \frac{L^3(F_2-F_1)}{48I_z(W_2-W_1)} \qquad \text{avec} \quad I_z = \frac{bh^3}{12} \qquad (1)$$

Tab.2 : Module de rupture et d'élasticité.

Essences	Poutrelles	MOR (MPa) Phase1/phase2	MOE (MPa) Phase1/phase2
Ozigo	OZ_3	34/61	10373/10516
	OZ_4	34/59	9344/9800
Niové	NI_3	92/143	17830/17909
	NI_4	92/119	15616/16390

Perspectives

L'objectif de cette première étude est de déterminer les caractéristiques mécaniques des lamelles constitutives des poutres BMR qui seront confectionnées dans la suite du projet et de les intégrer dans le modèle numérique. En perspective nous envisageons dans les jours qui suivent, de faire des essais de flexion et de fissuration sur des poutrelles en bois reconstituées par collage et des tests sur de joints de colles.

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère des eaux et forêts pour la transmission des données ayant servies à l'analyse multicritère (l'inventaire forestier et la consommation de grumes en 2017), la société EcoWood pour la fourniture du bois.

Références

NF EN 408., (2004) « Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé -Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques », *Edition AFNOR.*

CIRAD., (2011). « Tropix 7.0 » .http//tropix.cirad.fr/

Meunier Q., Moumbogou C., Doucet J-L., (2015). Les arbres utiles du Gabon, les presses Agronomiques de Gembloux. p. 9.

Poster C16

Conception et fabrication d'une brique adobe à base d'argile et de sciure de bois

OUM Joseph Bertrand[1], EKOMY ANGO Serge[3], MOUTOU PITTI Rostand[2, 3]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon.
[2]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, F63000, Clermont-Ferrand, France.
[3]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon.
ekomyango@yahoo.fr

Mots clefs : Argile, Azobé, Essai de compression, Sciure de bois, Padouk, Okoumé.

Contexte objectifs

Le Gabon dans la Loi n°016/01 portant Code Forestier en République Gabonaise dans son article 227 déclare : « la production nationale des grumes doit couvrir en priorité la demande des unités locales de transformation ». Nous remarquons que l'industrie de première transformation du bois est aujourd'hui très gaspilleuse de la ressource, à peine 20 à 30% de l'arbre abattu est valorisé (PSGE. 2008). A cela, s'ajoute la décision d'interdiction de toute exportation des grumes avec l'obligation de transformation sur place entrée en vigueur en 2010, qui a permis l'augmentation du nombre des industries de transformation du bois. Enfin, le coût élevé des parpaings en béton rend la construction très onéreuse au Gabon. L'objectif de cette étude est de concevoir et fabriquer une brique adobe à base d'argile et de sciure de bois ayant les meilleures caractéristiques mécaniques et physiques que la brique en terre battue artisanale produite localement.

Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental (Fig. 1) utilisé pour la fabrication des éprouvettes est composé d'un moule en aluminium (Fig. 1e), un tamis (Fig. 1b), et une presse (Fig. 1f).

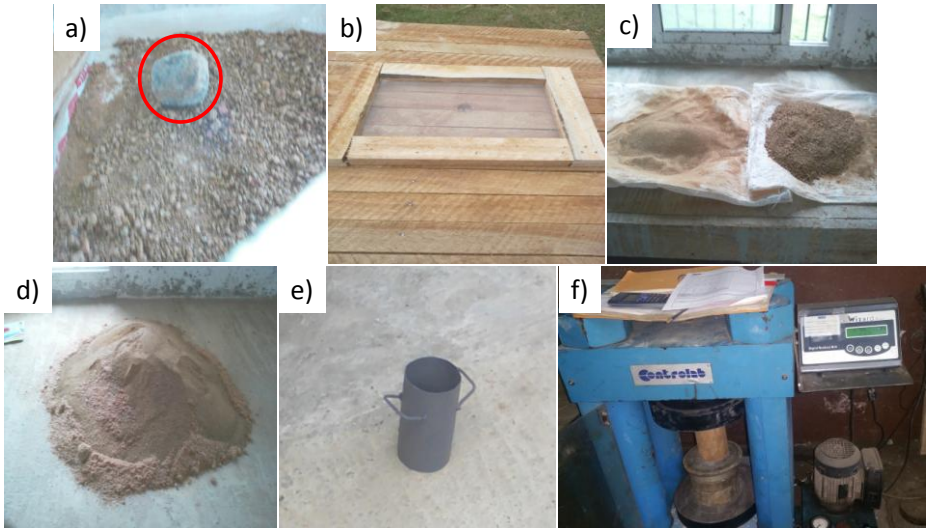


Fig. 1: dispositif expérimental : pierre de broyage (a) ; tamis (b) ; argiles (c) ; mélange argile sciure de bois (d) ; moule (e) ; presse (f)

Les matériaux utilisés pour fabriquer les briques de terre sont :

(i) l'argile à 85% (Fig. 1c) préalablement broyée à l'aide d'une pierre (Fig. 1a) puis tamisée à l'aide d'une moustiquaire (Fig. 1b). L'argile tamisée obtenue après ces opérations a été mélangée à la sciure de bois de chaque essence (Fig. 1d) avant le malaxage. L'argile retenue pour la confection des éprouvettes a été étudiée par l'Institut de Recherches Technologiques (IRT) du Centre National de la Recherche Scientifique (CENAREST) du Gabon en 2010, c'est une argile kaolinite colorée plus indiquée pour la fabrication des tuiles et des briques ;

(ii) La sciure de trois essences (azobé, okoumé, et padouk) à 15%. Le choix des essences a été guidé par leur disponibilité sur le territoire gabonais ainsi que leurs bonnes propriétés physico-mécaniques.

Résultats et discussions

Plusieurs gâchés (Fig. 1) ont été effectués afin d'obtenir les teneurs en eau des éprouvettes en terre crue suivantes : l'azobé : 29,96%, padouk : 35,65% et okoumé : 38,48% avec des taux d'absorption respectifs de 41,02%, 39,94% et 64%.

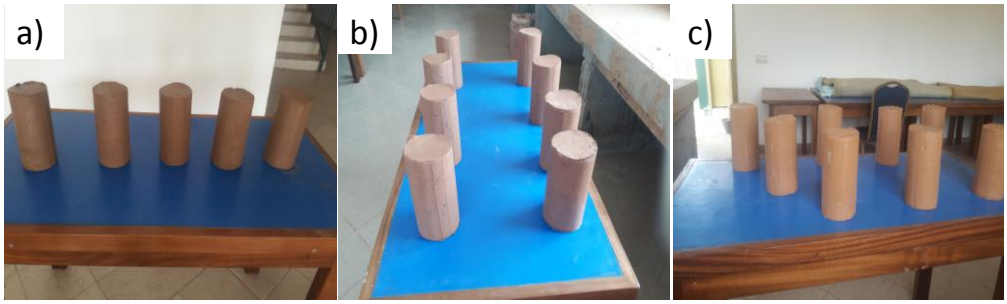


Fig. 2 : types de briques obtenues pour les 3 essences : Azobé (a) ; Okoumé (b) ; Padouk (c)

Les essais en compression sont mentionnés dans le tableau ci-dessus (Tab. 1). Au cours de ses essais, nous avons pu obtenir : la force maximale appliquée F, la contrainte à la rupture en compression R et le taux d'absorption.

Tableau 1 : Essai de compression

Echantillon	D (mm)	h (mm)	S (mm^2)	m (g)	F (N)	R (MPa)	W (%)	Taux d'absorption (%)
Az_1	95	184	7088	1972	29780	4,2	30.17	38.47
Az_2	95	184	7088	1967	18200	2,57	30.08	43.71
Az_3	95	184	7088	1984	18200	2,57	29.65	40.74
Pa_1	95	180	7088	1793	21400	3,02	35.59	37.93
Pa_2	95	180	7088	1810	20000	2,82	35.65	32.87
Pa_3	95	180	7088	1818	17600	2,48	35.71	43.11
Ok_1	93	181	6793	1780	22200	3,27	36.21	60.73
Ok_2	94	180	6940	1608	90300	13,01	39.43	72.87
Ok_3	94	181	6940	1660	21100	3,04	39.81	52.15

Pour chaque essence, nous avons pu avoir trois échantillons.

(i) Pour l'azobé, nous constatons que la force de compression des échantillons 2 et 3 est la même. Celle de l'échantillon 1 augmente à peu près de 1,6 % par rapport aux échantillons 2 et 3. En outre, nous remarquons que plus la force augmente, plus la contrainte à la rupture augmente dans les mêmes proportions. La variation de la force de compression n'a aucun incident sur la teneur en eau des échantillons. Plus la force de compression est grande, plus le taux d'absorption est petit.

(ii) Pour le padouk, l'écart des variations de la résistance à la rupture est presque le même entre les trois échantillons. Elle est identique à la force de compression. Comme l'azobé plus cette force augmente plus la contrainte à la rupture augmente. La teneur en eau est la même. Le taux d'absorption est plus important quand la force de compression est petite.

(iii) Pour l'okoumé, les échantillons 1 et 3 ont à peu près la même force de compression. Celle de l'échantillon 2 augmente d'environ 4,6% par rapport aux deux autres. Sa résistance à la rupture est 4 fois supérieure aux deux autres. Mais sa même teneur en eau est presque la même que l'échantillon 3.

Pour le moment parmi les neuf échantillons des trois essences, c'est l'échantillon 2 de l'okoumé qui a la plus grande force de compression, la meilleure résistance à la rupture et le meilleur taux d'absorption.

Conclusion et perspectives

Dans le cadre de cette étude expérimentale, nous avons procédé à la caractérisation mécanique des briques en terre crue d'argile à 85% et de sciure à 15% du volume massique. Dans l'avenir, nous souhaiterions étudier l'impact des sciures du bois sur la résistance mécanique, ensuite, analyser l'impact de l'environnement tropical sur la résistance mécanique, et effectuer des essais de flexion ; de traction et de cisaillement.

Références

Meukam, P. (2004).Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse de doctorat spécialité : énergétique-génie civil. Université de Cergy-Pontoise en cotutelle avec l'université de Yaoundé I.

Ministère des eaux et forêts : Loi nº016 du 31 décembre 2001 portant Code Forestier en République Gabonaise, 40 p.

Poster C17

Impact des variations climatiques sur la durée de vie des poutres entaillées de sapin blanc (*Abies Alba Mil*) et de Douglas (*Pseudotsuga Menziesii*) : étude expérimentale

ASSEKO ELLA Martian[1], PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman[1, 2], MOUTOU PITTI Rostand[2, 3], FOURNELY Eric[2], GRIL Joseph[2], GODI Gaël[2]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), Libreville, Gabon.
[2]Université Clermont Auvergne (UBP-IP), Clermont-Ferrand, France.
[3]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon.
martianenefgabon@gmail.com

Mots clefs : Fissuration ; flexion 4 points ; poutres entaillées ; déflexion ; ambiance extérieur

Contexte objectifs

Dans leur utilisation en structure, les poutres en bois sont soumises à des sollicitations mécaniques et environnementales qui ont des effets limitant sur leur durée de vie. En effet, la littérature montre que ce couplage amplifie, dans le temps, le vieillissement du bois (Manfoumbi, 2012 ; Saifouni, 2014) et donc de la structure elle-même, en affectant considérablement les propriétés mécaniques du bois utilisé. La majorité des campagnes expérimentales réalisées, pour mettre en évidence l'impact, de ce couplage, sur des poutres de bois, présente des essais de fluage des poutres non entaillées en flexion 4-points (Randriambololona, 2003 ; Merkeb, 2006). Ce travail associe : les processus de fissuration du bois (initiation et propagation des fissures), des variations climatiques et du chargement mécanique. L'objectif étant de mettre en évidence, sur la base des essais de fluage réalisés, le comportement thermo-hygro-mécanique des poutres préalablement entaillées de Sapin et de Douglas jusqu'à leur rupture. Les résultats prennent en compte des données obtenues sur une période de 3 mois sur des poutres chargées en ambiance extérieur, depuis 2 ans (Tran et al. 2018).

Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental est constitué d'un banc d'essais de fluage de flexion 4 points (Fig. 1a), sur lequel des poutres entaillées de Sapin blanc (*Abies Alba Mil*, S12) et de Douglas (*Pseudotsuga Menziesii*, D6) ont été chargées, de façon permanente, en flexion 4 points avec des blocs en béton (Fig. 1a). Des poutres témoins (Fig. 1b) de douglas (D0) et de sapin (S0), placées dans la même enceinte permettent de suivre, via un humidimètre (Fig. 1e), l'évolution de l'humidité interne dans les poutres. Chaque poutre testée est pourvue d'un capteur LVDT (Fig. 1d et 1h), placé à mi travée, servant à suivre l'évolution dans le temps de la flèche. Deux comparateurs étanches (Face A et Face C de la poutre, Fig. 1g et 1h) pour suivre l'évolution des ouvertures des fissures. Un trait gradué, de 1cm d'incrément, reliant les deux fonds d'entaille et placé sur tout le long des poutres, permet de suivre l'évolution dans le temps de la pointe de fissure, apparue (Fig. 1h). Le suivi de l'évolution des paramètres climatiques (Température T, Humidité Relative HR) se fait de deux manières différentes : une prise de données manuelles, grâce à un thermo-hygromètre (Fig. 1f) et une prise de donnée automatique grâce au laboratoire de physique et de météorologie (Lamp) de l'université de Clermont-Ferrand, dont les installations se trouvent 200 m du site d'essai (Fig. 1c).

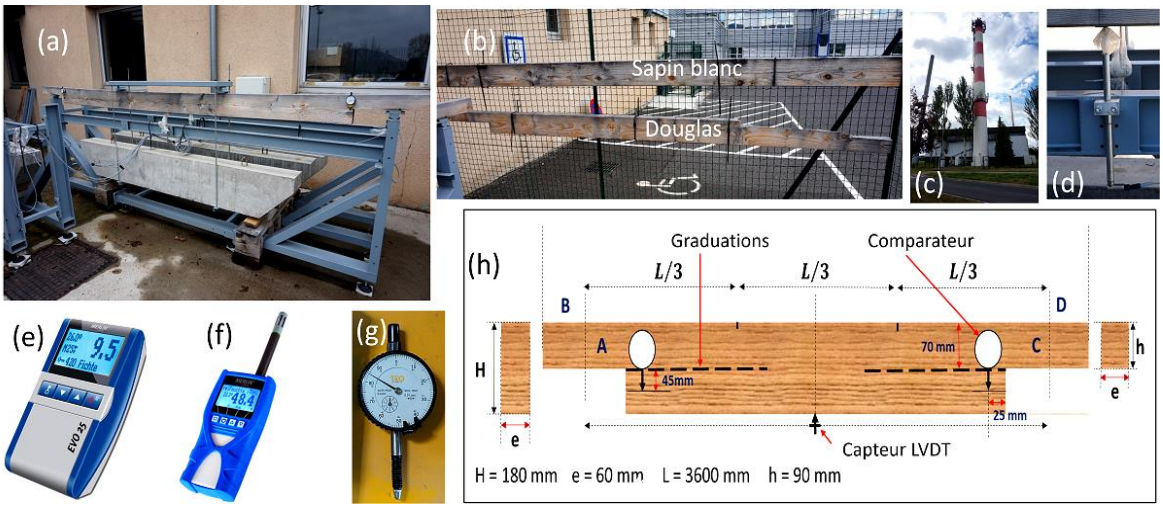


Fig. 1 : Dispositif expérimentale : (a) poutre de Douglas en essai de fluage (b) ; poutres témoins (c) dispositif de contrôles des données climatique de Lamp (d) ; capteur LVDT (e) ; humidimètre (f) ; thermo hygromètre (g) ; comparateur (h); Types des poutres testées.

Le Tab.1 présente les moyennes des paramètres climatiques, des données prélevées durant la période d'étude.

Tab.1 : Moyennes des paramètres climatiques relevés manuellement et automatiquement.

	Température (°C)		Humidité relative (%)	
	T manuelle	T automatique	HR manuelle	HR automatique
Moyenne	19,44±7,47	15,13±5,57	50,14±19,39	57,73±16,3

Résultats et discussions

Les Fig. 2 et 3, présentent respectivement, les effets des variations de l'humidité interne (HI), relevée sur les poutres témoins (D0 et S0), sur la déflexion des poutres D6 et S12. Les pics de HI importants observés sur les deux figures sont dus à des périodes d'humidification excessive (pluie). Sur ces différentes courbes on observe que la déflexion (F) augmente avec un léger temps de latence (zones encerclées Fig.2 et Fig.3) pendant les phases d'humidification et diminue lors d'une déshumidification. Le léger temps de latence observé sur la déflexion des poutres après une variation hydrique peut s'expliquer par les effets de diffusion consécutifs à la taille relativement importante des poutres. En effet, il faudrait un certain temps pour que les effets des variations hydriques puissent avoir un impact sur la déflexion des poutres.

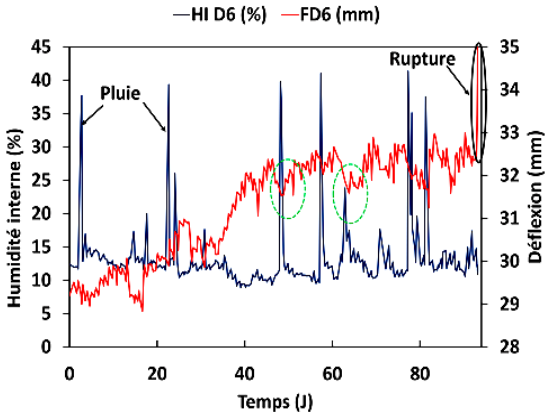


Fig. 2 : Impact de l'humidité sur la déflexion poutre de Sapin blanc

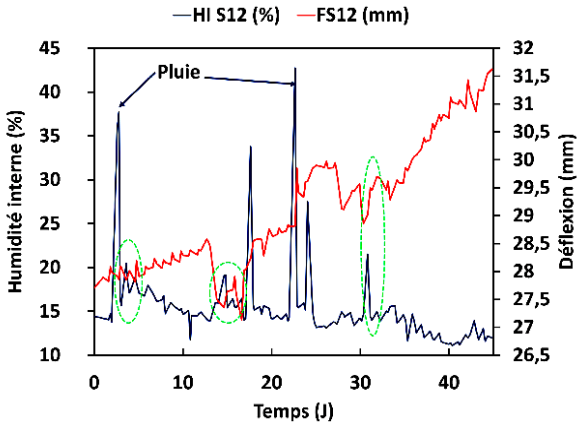


Fig. 3 : Impact de l'humidite sur la déflexion poutre de Douglas

Les Figures 4 et 5 suivantes, présentent le comportement des flèches des poutres D6 et S12 en fonction des ouvertures des fissures et de la propagation des fissures. Les courbes des ouvertures et des longueurs des fissures ont été obtenues en considérant la valeur moyenne des données relevées par les comparateurs et les traits gradués placés sur chaque poutre. On remarque sur la Fig.4 qu'il y'a une forte corrélation entre l'évolution de l'ouverture de la fissure et la flèche comme le montrent les zones encerclées. Sur la Fig.5 on observe que la propagation de la fissure influence fortement l'évolution de la déflexion de la poutre où on remarque en effet qu'à chaque départ de fissure, pendant les phases de séchage et certaines phases d'humidification (zones encerclées) que la déflexion des poutres augmente également, ce qui accroit le risque de rupture. Les départs de fissures observés pendant les phases d'humidification peuvent être attribuées aux effets du chargement mécanique.

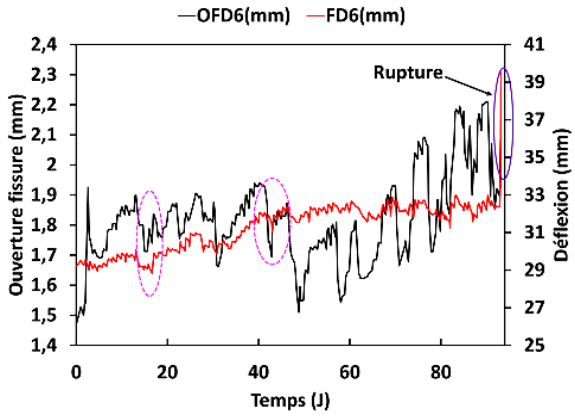


Fig. 4 : impact de l'ouverture de la fissuration sur la déflexion

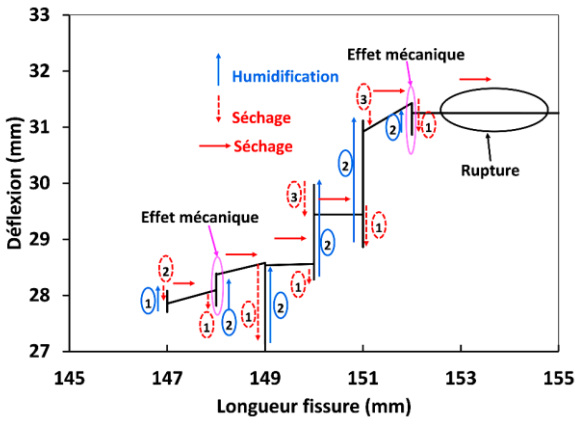


Fig. 5 : impact de la propagation de la fissure sur la déflexion

Conclusion et perspectives

Le but de ce travail était de mettre en évidence via une étude expérimentale les effets du comportement thermo hydromécanique sur la déflexion des poutres entaillées en ambiance extérieur. Les résultats obtenus pour cette étude, montrent que lors des phases d'humidification, sous chargement mécanique constant, il y'a une augmentation de la déflexion des poutres. Il est apparu aussi que le processus de fissuration accentue également l'évolution de la déflexion, ce qui multiplie les risques de rupture des poutres. À l'avenir, il serait intéressant de proposer un

modèle analytique de ce type d'études capable de prédire le comportement du bois en ambiance non contrôlé. Des meilleurs résultats pourraient également être obtenus si l'on parvient à relever l'humidité interne directement sur les poutres testées.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet ANR JCJC CLIMBOIS N° 13-JS09-0003-01, le pôle de compétitivité ViaMéca pour sa labélisation, le laboratoire de Météorologie Physique de l'OPGC pour la transmission des données climatiques, la Scierie du Forez via l'association Auvergne Promobois pour la fourniture des poutres, et enfin le projet PEPS Ingénierie verte « RUMO » pour le soutien financier.

Références

Manfoumbi Boussougou. N., Sauvat N, Dubois F. (2012). Experimental decoupling of wood elements under variable mechanic and hydro loads. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16(10):1168-1186

Merkeb., S. (2006). Modélisation des structures en bois en environnement variable. Thèse de doctorat. Université de limoges

Randriambololona. H, (2003), Modélisation du comportement du diffère du bois en environnement variable. Thèse de doctorat. Université de Limoges.

Saifouni O., Destrebecq JF., Froidevaux J., Navi P. (2à16) Experimental study of the mechanosorptive behaviour of softwood in relaxation. Wood Science and Tecg-hnology, 50(4): 789-805

Tran TB., Bastidas-Arteaga E., Aoues Y., Pambou Nziengui CF., Hamdi S.E., Moutou Pitti R., Fournely E., Schoefs F., Chateauneuf A. (2018) Reliability assessment and updating of notched timber components subjected to environmental and mechanical loading. Engineering Structures 166: 107–116

Poster C18

Mechanical properties of "flexure wood"

NIEZ Benjamin[1], DLOUHA Jana[2], TOUSSAINT Evelyne[3], GRIL Joseph[3], MOULIA Bruno[1], BADEL Eric[1]

[1]Université Clermont-Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont-Ferrand, France
[2]Université de Lorraine, AgroParistech, INRA, Silva, F-54000 Nancy, France
[3]Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand
benjamin.niez@inra.fr

Mots clefs : Mechanical stresses ; hydric stress ; thigmomorphogenesis ; wood properties ; functional acclimation ;

Context and objectives

Trees adjust their development to the fluctuating mechanical conditions they experience (Telewski (1989), Pruyn (2000), Kern (2005)). Storms events of last decades showed that acclimation of trees to mechanical stresses due to wind is a very important process that allows trees to sustain for long years. In the future, trees will experience new wind patterns regarding frequency and intensity (Haarsma (2013)). Moreover, these patterns will go along with drought periods (Chauveau (2013)) that may impair the capacity of trees to adjust their wood properties to mechanical stresses due to wind. It is necessary to understand the mechanisms of wood functional acclimations to environmental conditions in order to predict their behaviour and in order to give foresters and breeders the relevant tools to adapt their forest management. This work aims to study how trees adjust the mechanical properties of their wood to environmental stresses and how this acclimation may be beneficial for the tree to resist to future stresses.

Material and methods

Young poplars were grown under controlled climatic conditions that include permanent environmental stress (daily mechanical stress of the stem by bending and/or hydric stress). Then, the properties of wood formed under these stressed conditions were characterized. First, we developed an original setup to cut millimetric samples of wood at the intra-ring level. Secondly, we designed micro-mechanical tests (micro-bending test and Charpy impact test, Fig. 1) in order to locally measure mechanical behaviour at the tissue scale (elastic modulus, elastic limit, damaging, and rupture energy).

Results and discussions

These experimental data allowed to evaluate the impacts of periodic stem bending on the mechanical properties of green wood. At the intra-ring level, we distinguished the wood formed under compressive or tensile stresses. They show that stem bending generates the formation of a wood that is less vulnerable to damaging with a weaker specific modulus: this phenomenon is probably due to compressive strength that endures wood during its development. Finally, we show that severe hydric stress does not degrade the acclimation of wood mechanical properties to stem bending.

Conclusions and perspectives

Our work enlightens that acclimation of trees is a priority requirement for its survival i.e. trees adapt their wood mechanical properties to withstand mechanical perturbations even in drought conditions. Furthermore, it also shows that the acclimation to stem bending increases trees capacity to sustain mechanical stresses during wind events.

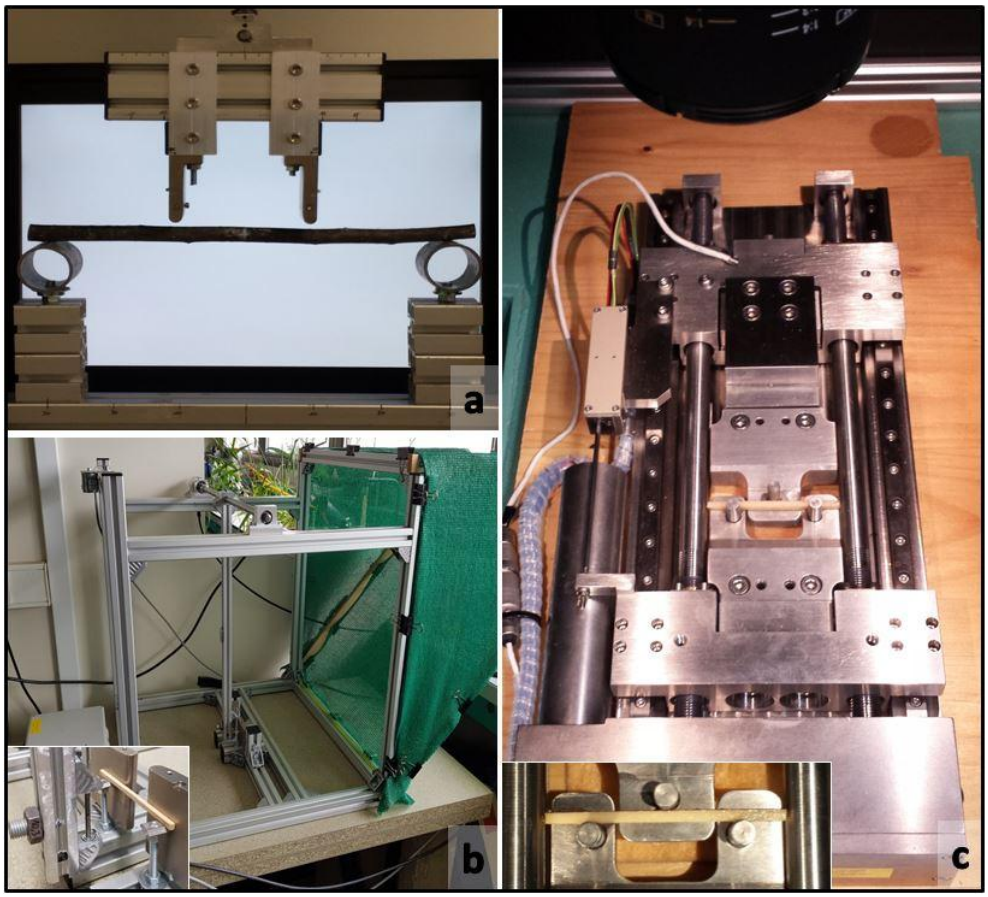


Fig. 1 : (a) Four points bending test on stem (34 cm length); (b) Charpy impact test on green wood matches (2×2×70 mm^3); (c) Micro-bending test on green wood matches (2×2×50 mm^3)

Références

Chauveau, M., S. Chazot, C. Perrin, P.Y. Bourgin, E. Sauquet, J.P. Vidal, N. Rouchy, E. Martin, J. David, T. Norotte, P. Maugis and X. de Lacaze. 2013. What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070? Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau:5-15.

Haarsma, R.J., W. Hazeleger, C. Severijns, H. de Vries, A. Sterl, R. Bintanja, G.J. van Oldenborgh and H.W. van den Brink. 2013. More hurricanes to hit western Europe due to global warming. Geophysical Research Letters. 40:1783-1788.

Kern K.A., Ewers F.W., Telewski F.W., Koehler L. (2005) Mechanical perturbation affects conductivity, mechanical properties and aboveground biomass of hybrid poplars, Tree Physiology, 25:1243-1251

Pruyn M.L., Ewers B.J., Telewski F.W (2000) Thigmomorphogenesis: changes in the morphology and mechanical properties of two Populus hybrids in response to mechanical perturbation, Tree Physiology, 20:535-540

Telewski F.W. (1989) Structure and function of flexure wood in Abies Fraseri, Tree Physiology, 5:113-121

Poster C19

Mona Lisa's digital twin: identifying the mechanical properties of the panel combining experimental data and advanced finite-element modelling

RIPARBELLI Lorenzo[1], DIONISI-VICI Paolo[1], DUPRE Jean-Christophe[2], GOLI Giacomo[1], JULLIEN Delphine[3], BREMAND Fabrice[2], MAZZANTI Paola[1], HESSER Franck[2], MARCON Bertrand[1,3], TOGNI Marco[1], GAUVIN Cécilia[3], ARNOULD Olivier[3], VALLE Valery[2], DUREISSEIX David[3], COCCHI Linda[1], MANDRON Patrick[4], RAVAUD Elisabeth[5], UZIELLI Luca[1], GRIL Joseph[3,6]

[1]GESAAF, Univ. Florence, Florence, Italy
[2] Institut PPRIME, Univ. Poitiers, CNRS, France
[3] LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France
[4] Les Ateliers Enghien, Paris, France
[5] C2RMF, Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris, France
[6] Institut Pascal, Univ. Clermont Auvergne, CNRS, Sigma Clermont, Clermont-Fd, France
lorenzo.riparbelli@unifi.it

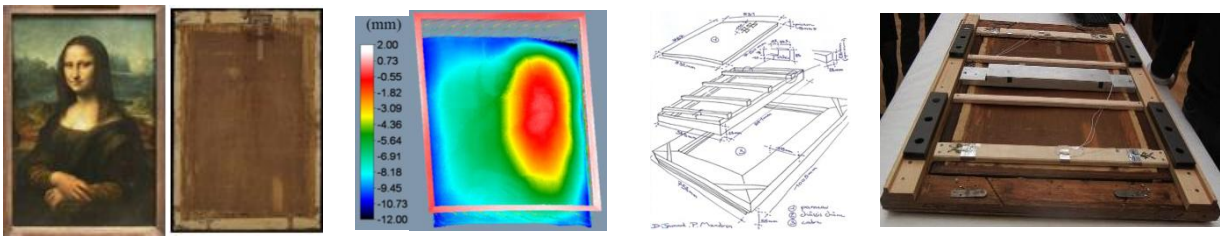
Mots clefs : digital twin ; Mona Lisa ; finite elements ; panel painting ; mechanical properties ; optimisation ; experimental tests

Background and objectives

Since 2004, the "Mona Lisa" painting by Leonardo da Vinci has been studied by an international research group of wood scientists and several experimental campaigns have been carried out to understand its characteristics and provide indications for its conservation. Based on the collected data, a numerical model of the wooden panel has been developed to simulate the mechanical interaction with the framing system. The main objective of this modelling work, described in this paper, is to extract as much information as possible from the experimental tests carried out and, thus, reach a sufficient level of scientific knowledge of the mechanical properties of the panel to build a predictive model. It will be used to predict the effect of modified boundary conditions and as a tool of preventive conservation.

Material and methods

The artwork is painted on one face of a flat-sawn poplar (*Populus alba* L.) panel (Fig.1a) doubly curved toward the front side (Fig 1b) and pressed on a chassis rebate by the action of crossbars screwed on the chassis (Fig.1c) ; the external frame contributes to the stiffness of the whole through metal legs (Fig 1d). An ancient crack runs through the wood from the left upper edge of the panel down to the top of the Lady's face.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 1 : Mona Lisa panel painting (a) Painted face and back face; (b) Shape of the panel obtained by fringe pattern profilometry; (c) The panel and its framing system, chassis with crossbars and gilded frame; (d) View of the monitoring systems and the complete assembly

The observations methods, partly described in early reports (Mohen et al 2006, Gril et al 2015), include: (i) optical measurements of the form (Fig. 1b, Brémand et al 2011); (ii) scientific and technological analysis of the wooden support; (iii) continuous monitoring of the forces applied by the crossbars on the back of the panel, and of the central deflections relative to an additional metallic crossbar equipped with transducers (Fig. 1d); (iv) determination of contact areas between the front of the painting and the chassis rebate using pressure-sensitive sheets (Goli et al. 2013).

Based on these results, a finite-elements digital twin was built according to the following steps:

1. Acquisition of the object's shape through optical methodologies and reconstruction of a three-dimensional geometrical model (Fig. 2).
2. Enrichment of this geometry with additional entities defining the boundary conditions (positions and contact areas detected by pressure test on the front side, position of the load cells attached to the crossbars on the back side), the crack on the upper side of the panel. The position of the pith with respect to the panel was also taken into consideration, for the definition of cylindrical coordinates to define orthotropic characteristics.
3. Acquisition and treatment of experimental measurements related to load cells and transducers that continuously record the panel status, in addition to the experimental data acquired by the research group in various studies over the years.
4. Construction of the numerical model using the finite-element method (FEM), evaluation of the discretization, boundary conditions and contact mechanics modelling (Fig. 3).
5. Iterative optimization procedure, through Nelder-Mead (downhill simplex) scheme, for the calibration of the mechanical characteristics of the model based on the experimental response and the control of results consistency.

All the analyses are performed with the FEM solver Code_Aster in the Salome-Meca ecosystem.

Results and discussion

In summary, starting from the shape detected by the optical measurement and through an optimization process that determined the elasticity properties of the wood, a non-linear model that accounts for the complex unilateral contacts detected during specific experimental campaigns, and for the orthotropic anatomy of the panel, has been developed.

This calibrated model (digital twin) is then used to understand the stress and deformation states related to changes in the boundary conditions, to correlate the forces (measured by the load cells the panel is equipped with, or hypothesized on a simulation level) and the stress states to which the panel is subjected.

The digital twin is also used to assess the effect of inserting a layer of viscoelastic polymer foam for protective purposes between the painting and the chassis (Fig. 4).

Finally, a methodology for comparing two different mechanical configurations is proposed through the numerical computation of point-by-point stress and deformation differences, in order to provide information to the conservators, such as optimizing setting and constrains.

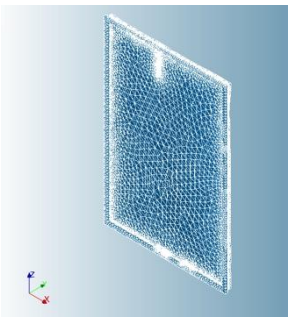


Fig. 2 : Quadratic Mesh of the assembly panel - chassis with mesh refinement on crack and contact areas: 194714 tetrahedrons

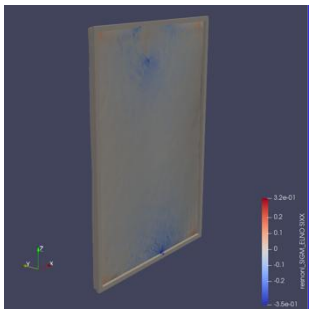


Fig. 3 : Stress generated by wood-wood non-linear contact with friction between the panel and the chassis

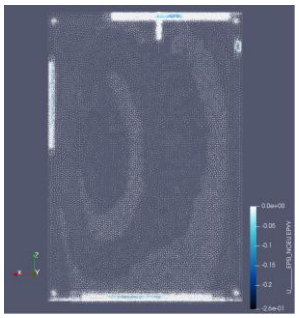


Fig. 4 : Simulation of the deformations of a viscoelastic foam between two wood interfaces with non-linear contacts

Acknowlegments

We thank the Louvre Museum for allowing the access to the artwork

References

Brémand, P. Doumalin, J.C. Dupré, A. Germaneau, F. Hesser, V. Valle (2011) Mechanical structure analysis by Digital Image Correlation and Fringe Pattern Profilometry, Proceedings of Joint focused meeting, COST Actions IE0601 and IE0601 Non-destructive techniques to study Wooden Cultural Heritage Objects (WCHOs), 6-7 May 2011, Cité de la Musique, Paris, France

Électricité De France - EDF. Finite element code_aster, Analyse des Structures et Thermo-mécanique pour des Etudes et des Recherches, open source on www.code-aster.org, 1989-2018.

Goli, G., Dionisi-Vici, P., Uzielli. L. (2014) Locating contact areas and estimating contact forces between the “Mona Lisa” wooden panel and its frame, Journal of Cultural Heritage, 2013, vol. 15(4), 391-402.

Gril J., Cocchi L., Marcon B., Dionisi-Vici P., Goli G., Mazzanti P. Togni M., Uzielli L. (2015) The Mona Lisa Project: An update on the progress of measurement and monitoring activities, Euromech conference “Theoretical, Numerical, and Experimental Analyses in Wood Mechanics”, Dresden, DE, 27-29.05.15

Gril J., Ravaud E., Uzielli L., Dupré J.C., Perré P., Dureisseix D., Arnould O., Dionici Vici P., Jaunard D., Mandron P. (2006), Mona Lisa saved by Griffith theory: assessing the crack propagation risk in the wooden support of a panel painting, International conference on integrated approach to wood structure, behaviour and application, joint meeting of ESWM and COST Action E35, Florence, Italy, 15-17.5.06, M. Fioravanti, N. Macchioni (eds), 109-114.

Mohen J.P., Menu M., Mottin B. (2006) Au Coeur de La Joconde, Gallimard, Paris (English and German translations)

Dureisseix, D. and Marcon, B. (2011), A partitioning strategy for the coupled hygromechanical analysis with application to wood structures of cultural heritage. Int. J. Numer. Meth. Engng., 88: 228-256. doi:10.1002/nme.3173

Marcon B, (2009), Hygromécanique des panneaux en bois et conservation du patrimoine culturel. Des pathologies... aux outils pour la conservation. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. (in French)

Session Poster D

D01 : Caractérisation des assemblages réalisés en bois feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5, Benistand Thibault et al. 255

D02 : Optimisation de l'extraction et caractérisation de la lignine du bois d'Okoumé par le procédé de l'explosion à la vapeur, Ngwa Obame Sébastien . . 260

D03 : Le modèle de poutre sur fondation comme méthode alternative au dimensionnement des assemblages bois de type tiges, Lemaître Romain et al. . 264

D04 : Imagerie hyperspectrale et chimie du bois – qualité du bois et contraintes de croissance (hydrique et minérale), Chaix Gilles 268

D05 : Durabilité naturelle : comparaison des essais en laboratoire et des essais au champ basés sur des espèces de bois de Madagascar, Razafimahatratra Andriambelo Radonirina et al. 272

D06 : Développer la connaissance des propriétés de bois des essences autochtones de Madagascar vers une utilisation durable des ressources locales, Razafinarivo Ravo Nantenaina Gabriella et al. 275

D07 : Potentialités de la spectroscopie proche infrarouge comme aide à l'identification des bois de l'Annexe II de la CITES : cas de quatre espèces de Dalbergia de Madagascar, Ramananantoandro Tahiana et al. 278

D08 : Etude De La Transformation De Produits Connexes De Bois Et Plastiques/Polystyrène Expansé En Matériaux Sandwich Autoadhésifs, Amadji Togbé-Armel et al. 280

D09 : Valorization of pyrolysis by-products for the protection of biomaterials, Boer Febrina Dellarose et al. 284

D10 : Impact of torrefaction processes on brazilian biomasses storage, De Freitas Homen De Feria Bruno et al. 287

D11 : Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides tchadiennes, Dougabka Dao et al. 291

D12 : Activité antibactérienne de l'huile essentielle extraite de la sciure de bois de Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus., Ouaar Djilali et al. 294

D13 : Extraforest : conception d'un outil d'aide à la décision pour rapprocher la chimie et les filières forêt-bois en régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté, Pichancourt Jean-Baptiste et al. 298

D14 : Radial variation of wood properties on hardwood recovered from thinning, Purba Citra Yanto Ciki et al. 302

D15 : Conception et évaluation de systèmes d'innovation pour mieux mobiliser les bois en petite propriété forestière privée, Arnould Maxence et al. 306

D16 : Surface characterisation of untreated wood surfaces after artificial and natural weathering, Buchner Julia et al. 310

D17 : Direct DRAQ5 DNA staining on sterilized and contaminated wood surface, investigation by confocal microscopy, Munir Muhammad Tanveer et al. 314

D18 : Etude de faisabilité d'un système d'attache résiliente en bois, Michaud Franck et al. 318

D19 : Les structures bois dans l'environnement Guadeloupéen, projet Bois Duramhen 971, Fournely Eric et al. 322

D20 : Les Structures bois dans l'environnement Martiniquais, projet Bois Duramhen 972, Quistin Paul et al. 326

Poster D01

Caractérisation des assemblages réalisés en bois feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5

BENISTAND Thibault[1], BLERON Laurent[1], BOCQUET Jean-François[1]

[1]LERMAB – ENSTIB - Université de Lorraine
thibault.benistand@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Feuillus, Bois Français, Assemblages, EUROCODES

Contexte et objectifs

En dépit du fait que le territoire français intègre la plus grande forêt de feuillus d'Europe avec près de 1200 Millions de m^3 de hêtre, chêne, frêne et châtaignier, la construction bois utilise en majorité des bois résineux provenant de France et d'Europe. Selon les chiffres édités dans le mémento bois du FCBA (2017), nous consommons en France, tout usage confondu, les deux tiers de l'accroissement naturel de nos forêts de résineux. L'augmentation du marché de la construction bois en France et la ressource locale feuillue mobilisable, poussent donc logiquement les acteurs de la filière bois à réfléchir et à commencer à mettre en œuvre ces essences dans le bâtiment.

Les Eurocodes et les normes européennes associées sont bâties sur les expériences et recherches menées au cours des 70 dernières années sur les résineux. Une meilleure utilisation du bois feuillu dans les structures ne pourra se faire qu'en conduisant des études similaires sur ces essences (Bleron (2012)). Ces travaux permettront de redéfinir les paramètres de calcul ainsi que les propriétés mécaniques de ces bois afin de trouver un optimum dans la mise en œuvre. Le programme EFEUR5 (comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5) a cet objectif et cette ambition pour conduire à la mise sur le marché de produits structurels issus de bois feuillus français.

Actuellement, le calcul des assemblages bois est réalisé selon l'analyse limite de Johansen (1949) intégrée dans l'Eurocode 5. A partir des paramètres géométriques de l'assemblage (diamètres des organes, épaisseurs des bois assemblés, nombre d'organes…) et de deux paramètres physiques (la portance locale du bois et la résistance plastique des organes) il est possible d'estimer la résistance des assemblages. La portance locale correspond à la résistance du bois vis-à-vis de l'enfoncement d'une tige métallique circulaire dans celui-ci. La relation permettant d'estimer cette propriété à partir de la masse volumique et du diamètre de l'organe a été introduite par Ehlbeck et Werner (1992). L'équation de l'Eurocode 5 qui provient de cette étude détermine la portance indépendamment de l'essence des bois. Cette relation a tendance à minimiser la portance locale pour les bois feuillus (ordre de grandeur de 10%). Pour concurrencer les bois résineux il est indispensable d'étudier et de proposer une définition de la portance locale plus juste pour ne pas pénaliser doublement les bois feuillus qui ont déjà un coût matière plus important que les bois résineux. Les objectifs de EFEUR 5 concernant l'étude des assemblages sont donc les suivants :

- Définir une loi de portance locale parallèle au fil du bois $f_{h,0,k}$ spécifique aux bois feuillus français et la comparer avec la loi actuelle de l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1).
- Définir le facteur k_{90} nécessaire au calcul de la portance locale perpendiculaire au fil du bois à partir de la valeur de $f_{h,0,k.}$
- Vérifier et quantifier la fissilité des assemblages par traction transversale lorsque les organes d'assemblages sont repartis selon une même file (Principe de n_{ef})

- Amender les lois de raideurs d'assemblages proposées dans l'Eurocode 5.

Matériel et méthode

Pour recueillir une quantité des données expérimentales suffisamment importante, plusieurs configurations d'assemblages ont été testées en faisant varier : les essences (Hêtre, Chêne et Peuplier), les diamètres (12, 16 et 20mm) et l'angle de l'effort par rapport au fil (0 ou 90°). Il a été réalisé un minimum de 30 essais de portance locale selon la norme EN 383 par configuration. Avant essais, les bois ont été conditionnés à une température de 20°C et une humidité relative de 65% pour tenter d'obtenir une humidité des bois de 12%. Les organes utilisés pour les essais de portance sont similaires à ceux mis en œuvre dans les projets de construction, à savoir : acier galvanisé de classe 8-8.

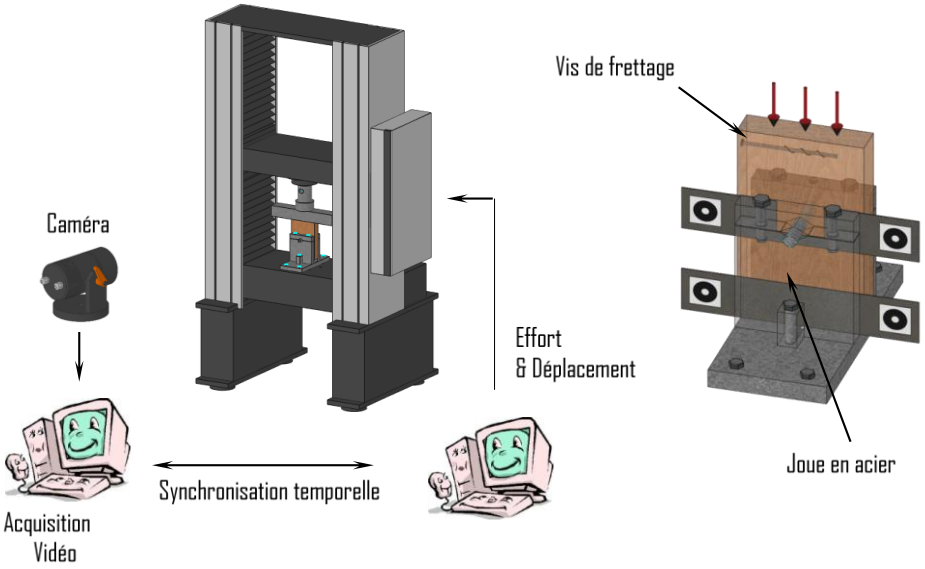


Fig. 1 : Configuration pour les essais de portance

Les essais ont été réalisés sur une machine ZWICK Z250 avec un montage développé au LERMAB. Les deux joues en acier situées de part et d'autres de l'éprouvette permettent un encastrement de l'organe pour augmenter sa rigidité en flexion, limiter sa déformation et ainsi n'obtenir que la rigidité du bois vis-à-vis de l'enfoncement de la tige. Pour limiter l'ouverture de fissures en traction transversale dans le cadre des essais à 0°, les essais ont été frétés avec des vis de 5 mm de diamètre sans pré-perçage.

Le traitement des données et l'obtention des valeurs caractéristiques, à partir des 640 essais réalisés, est exécutée par méthode statistique paramétrique selon la norme EN 14358. Les masses volumiques sont corrigées pour les ramener à une humidité de référence de 12% conformément aux exigences de l'EN 384.

Dans un second temps, des essais d'assemblages ont été réalisés, avec deux diamètres différents d'organes (12 et 16 mm) et différentes épaisseurs de bois (12, 30 et 85 mm). Les résultats des essais ont été comparés aux résultats simulés par un modèle MEF d'assemblages bois développé au LERMAB et présenté au GDR en 2017 et 2018 par Romain LEMAITRE (2018). Le modèle est alimenté par les nouvelles lois de portance locale définies dans le cadre du projet EFEUR 5.

Résultats et discussion

Les essais de portances à 0° ont montré une corrélation forte entre la densité et la portance locale (R^2 variant entre 0.43 et 0.74). Ils ont également montré l'influence connue du diamètre de l'organe et de l'essence du bois sur cette propriété mécanique.

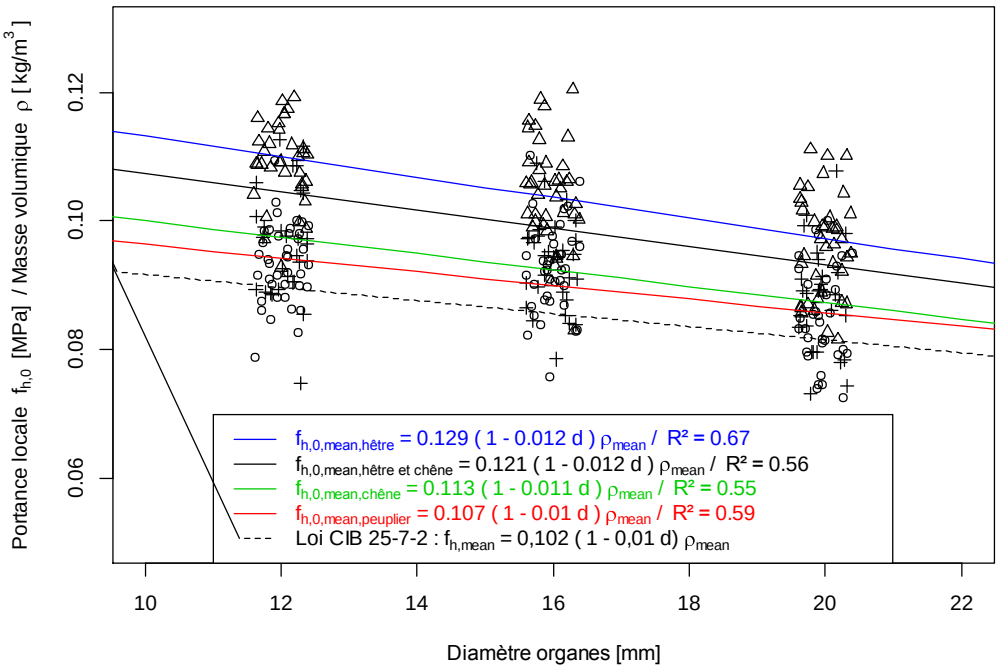


Fig. 2 : Portance locale à 0° $f_{h,0}$ pour chaque essence.

A partir des lois moyennes ainsi trouvées, il est possible de définir des lois caractéristiques au fractile de 5% selon la méthode développée par Ehlbeck and Werner (1992). La loi caractéristique démontrée ici regroupe hêtre et chêne et permet un gain de 20% de portance locale pour les organes d'assemblages compris en 12 et 20mm par rapport à la loi proposée dans l'Eurocode actuel :

$$f_{h,0,k} = 0.082\ (1 - 0.010\ d)\ \rho_k \quad Loi\ EN\ 1995$$

$$f_{h,0,k} = 0.103\ (1 - 0.011\ d)\ \rho_k \quad Proposition\ EFEUR\ 5$$

Les essais de portance à 90° ont, quant à eux, mis en évidence une estimation trop importante de la portance locale par l'Eurocode. Néanmoins, du fait de la minimisation systématique de la masse volumique via le système de classement mécanique des bois, la sinistralité reste faible (pour le D24, la norme suppose une masse volumique de 580 kg/m^3, alors que dans le cadre de la campagne d'essais leur masse volumique a été mesurée à 640 kg/m^3).

Les essais ont permis de définir les lois caractéristiques à 90° et ainsi de proposer un facteur k_{90} tel que :

$$k_{90} = \frac{f_{h,0,k}}{f_{h,90,k}} \quad soit\ une\ nouvelle\ équation \quad k_{90} = 1.232 + 0.0332\ d$$

Finalement, les essais d'assemblages ont mis en évidence deux phénomènes majeurs :

- La rupture des assemblages par fendage ne s'est produite que pour les modes de rupture 1 et 2 de l'analyse limite de Johansen. Au-delà d'une certaine épaisseur des bois, contrairement à ce qui est proposé dans l'EC5, il y a une plastification de l'assemblage. Il convient donc de réaliser un plus grand nombre d'essais pour

proposer, une nouvelle approche normative de la rupture par fendage limitant ainsi la nécessité de mise en œuvre de renforcements généralement peu économique.

- Les lois de raideurs proposées dans l'EC5 surestiment largement les rigidités observées dans le cadre des essais d'assemblages. De plus, elles n'intègrent pas, contrairement à ce qui est observable avec le modèle MEF, une évolution en fonction de l'épaisseur des bois. Une révision de ces lois est donc obligatoire pour limiter les déformations des structures et potentiellement leur sinistralité de service (ELS). Ce paramètre est d'autant plus important qu'il est essentiel pour le dimensionnement des bâtiments de grande hauteur, bâtiments pouvant offrir des débouchés importants pour des produits à base de bois feuillus car de plus en plus nombreux en France.

Conclusion et perspectives

La définition d'une nouvelle loi de portance locale basée sur la ressource française semble être indispensable à une meilleure utilisation des bois feuillus dans la construction. Le coût matière plus important de ces bois vis-à-vis des résineux pourra ainsi être compensé par des économies au niveau des assemblages (diminution du nombre d'organes, augmentation de leur espacement…). Une augmentation du nombre d'essais et un prélèvement sur l'ensemble du territoire français et/ou européen constitue la dernière étape à réaliser pour proposer demain une nouvelle équation dans l'Eurocode.

D'autres essais d'assemblages doivent être réalisés afin de valider les observations faites et proposer à la fois une nouvelle équation de la raideur dans l'EC5 et également une amélioration de la prise en compte des ruptures fragiles par fendage dans les assemblages.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet EFEUR5 (2015-2020) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (convention ANR-15-CE08-0027).

Références

Bleron L., Le Magourou L., Martin P., et Rossi F. (2012) Intégration des données manquantes concernant les bois feuillus pour l'utilisation de l'Eurocode 5.

Ehlbeck J., Werner H. (1992), Softwood and harwood embedding strength for dowel-type fasterners.

Johansen K.W. (1949) Theory of timber connections.

Lemaitre R., Bocquet J-F., Schweigler M., Bader T. K. (2018) INTER, Beam-on-Foundation (BOF) Modelling as an Alternative Design Method for Timber Joints with Dowel-Type Fasteners – Part 1: Strength and Stiffness per Shear Plane of Single-Fastener Joints.

EN1995-1-1 (2005) : Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments.

NF EN 383 (2007) : Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblage de type broche.

NF EN 384 (2016) : Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique.

NF EN 14358 (Avril 2007) - Détermination des valeurs correspondant au fractile à 5 % d'exclusion inférieure et critères d'acceptation pour un échantillon.

Poster D02

Optimisation de l'extraction et caractérisation de la lignine du bois d'Okoumé par le procédé de l'explosion à la vapeur

NGWA OBAME Sébastien[1,2], SAFOU-TCHIAMA Rodrigue[2], DEVIN-ZIEGLER Isabelle[1], BROSSE Nicolas[1]

[1]Laboratoire d'Etude et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMaB), Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine,Vandœuvre-lès-Nancy, France
[2]Laboratoire de Recherche et de Valorisation du Matériau Bois (LaReVa Bois). Bât du Master Recherche en Sciences du Bois. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Libreville, Gabon
Sebastien.ngwa-obame@univ-lorraine.fr

Mots clefs : *Aucoumea klaineana Pierre* ; bioéthanol ; déchets du bois ; explosion à la vapeur ; prétraitement.

Contexte et objectifs

Qualifié de bois d'excellente qualité en 1889, *Aucoumea klaineana* Pierre (Okoumé) est l'essence phare de la filière bois du Gabon et largement disponible (Minkué 2000, Medzegue 2007). Le développement d'unités de déroulage et de tranchage de cette essence suite à la crise financière qui a touché la zone Asie en 1998 et en 2001 a provoqué une réorientation de la politique industrielle du Gabon. Il s'en suit une production de rebuts de bois (houppier abandonné en zone d'abattage, noyau de déroulage, copeaux, dosses de sciage...) faiblement valorisés. De plus, le pays reste dépendant des revenus pétroliers dont la contribution est de 40% du PIB et le secteur financier très vulnérable à la chute du prix du pétrole avec une baisse de 37% des recettes pétrolières en 2008 et 31% en 2014 (FMI, 2016). D'où la nécessité d'une valorisation optimale des ressources naturelles pour renforcer l'activité économique. L'objectif de ce travail est d'effectuer une étude pour la valorisation de type bioraffinerie des produits connexes de l'industrie du bois d'okoumé. Le prétraitement par explosion à la vapeur constitue l'une des technologies de prétraitement du bois les plus prometteuses pour déstructurer la matrice lignocellulosique et pour une libération plus aisée de monosaccharides fermentescibles. En effet ce procédé est viable économiquement par sa faible consommation d'énergie (Sawada and Nakamura, 2001), et respectueux de l'environnement (Holtzapple et al., 1989). Dans ce travail on se concentre sur la lignine d'okoumé isolée par explosion à la vapeur, la lignine étant un co-produit du prétraitement à valoriser. A cet effet, nos travaux portent sur (1) l'optimisation du prétraitement en vue d'une délignification appréciable, (2) l'impact du traitement sur la structure de la lignine pour une meilleure valorisation.

Matériels et méthodes

L'aubier et le cœur d'okoumé (*Aucoumea Klaineana Pierre, masse volumique à l'état anhydre=0,484g/cm^3 et 0,429 g/cm^3* respectivement), ont été récoltés à la Société Nationale des Bois du Gabon, spécialisée dans le sciage et le déroulage. Les échantillons sont mis à l'abris de l'humidité et des attaques fongique tout au long de l'étude.

Environ 110 g de biomasse d'okoumé sont d'abord séchés à l'étuve (105°C) pendant 24h, puis 100 g sont imprégnés pendant 24h dans 575 ml d'eau courante (rapport masse/liquide, 1/6) et l'excès d'eau est éliminé par filtration. La matière récupérée est introduite dans le réacteur pilote de 2L. Après un temps de séjour et suivant la température définie la biomasse est éjectée du réacteur et récupérée au niveau de l'éclateur. Le liquide est séparé de la fraction

solide par filtration sous vide modéré et conservé à -4°C pour une caractérisation chimique ultérieure. Dans le cas d'une pré-imprégnation acide le solide est lavé jusqu'à l'obtention d'un pH neutre. La phase solide est d'abord séchée à l'air libre pendant 48h puis à l'étuve à 105°C pendant 24h. La lignine de cette fraction solide est ensuite extraite au soxhlet avec de l'éthanol dans un ballon de 250 mL. Apres 24h de réaction, lorsque le solvant est incolore, le liquide du ballon riche en lignine est concentré à l'aide d'un évaporateur rotatif jusqu'à environ 50mL. La lignine du concentrât est précipitée en milieu acide (HCl, 6M) à pH 2, puis centrifugée à 4000 trs/min pendant 20min et séchée à l'étude à 40°C pendant 48h. La lignine ainsi séchée est d'abord pesée pour déterminer le rendement de l'extraction. Elle est ensuite purifiée au soxhlet avec de l'hexane pur pendant 24h puis séchée à l'étuve à 40°C pendant 24h. la lignine obtenue est caractérisée en chromatographie et RMN.

Résultats

Le prétraitement de l'explosion à la vapeur permet la séparation de la fraction hémicellulosique et l'élimination de la lignine augmentant ainsi l'accès aux fibres de cellulose (Grous et al., 1986). D'après la technologie du procédé l'efficacité de l'optimisation dépend du temps de rétention et de la pression qui elle, est corrélée à la température. Afin de comparer les différents essais, les conditions opératoires ont été décrites par les indices de sévérité selon l'équation : Sévérité=$t\times\exp(T-T_R/14,75)$. Dans un premier temps l'influence de la granulométrie a été étudiée avec comme variable, la température (170°C-190°C-210°C), le temps de séjour (2,5mn- 5mn-7,5mn) et la taille des fibres (0,16mm-1mm-2mm). Dans un second temps, l'influence de la catalyse est étudiée où la température (170°C-190°C-210°C), le temps (2,5mn-5mn-7,5mn) et la concentration en acide sulfurique de la solution d'imprégnation avant traitement par rapport à la masse de fibre (0%-0,25%-0,5%) sont les trois facteurs mis en jeu.

Les résultats sur l'optimisation de la délignification montrent que le rendement en lignine extraite lors du prétraitement augmente avec la sévérité des conditions (fig.1). Ces rendements sont plus élevés pour les particules de 2 mm et 1 mm. Ainsi pour une même sévérité maximale (4,1), environ 4,3 % de lignine est extraite pour les particules de 2 mm contre 2,9 % pour celles de 0,16 mm montrant clairement les différences des rendements obtenus. Les meilleurs rendements de délignification sont obtenus pour les particules de 2mm et 1mm. L'utilisation de particules plus petite n'a pas d'effet sur l'amélioration du rendement de délignification. Il a été montré que la teneur en humidité a un effet sur la vitesse de montée en température à l'intérieur des fibres et que ce facteur dépend de la taille des fibres(Brownell et al., 1986). Pielhop et al., (2016), Ballesteros et al., (2002) ont trouvé la même tendance dans leurs travaux. Le choix pour la suite de l'étude s'est porté sur les fibres de 2mm car plus économique en terme d'énergie de broyage et une meilleure solubilisation des hémicelluloses (résultat non présenté).

Le prétraitement en milieu acide (résultats non présentés) donne un rendement maximal en lignine insoluble extraite plus élevé par rapport au traitement aqueux dont 14 % contre 4 % respectivement à $S_0\geq 2,5$ et $S_0\geq 4,1$. L'ajout d'un acide hydrolyse donc plus de lignine (52 % de récupération) et à des sévérités plus faibles. Pour mieux comprendre ce phénomène d'extractabilité et le comportement de la lignine lors du processus de l'explosion à la vapeur des analyses en spectroscopie sont réalisées.

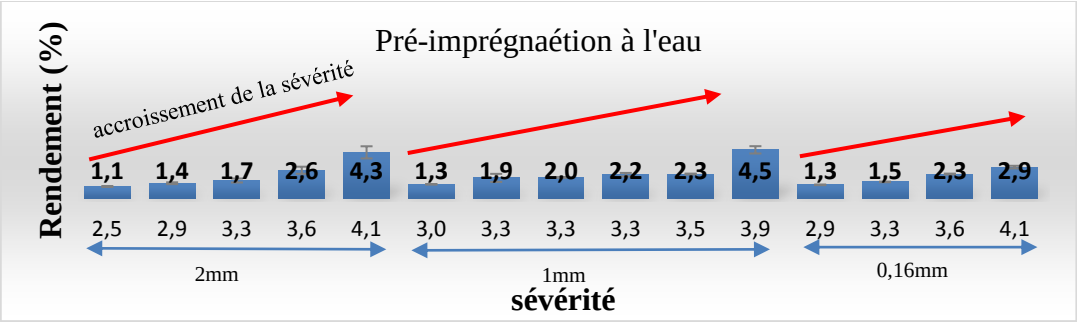


Fig.1 : Taux de lignine extraite en fonction de la taille des fibres et de la sévérité du traitement

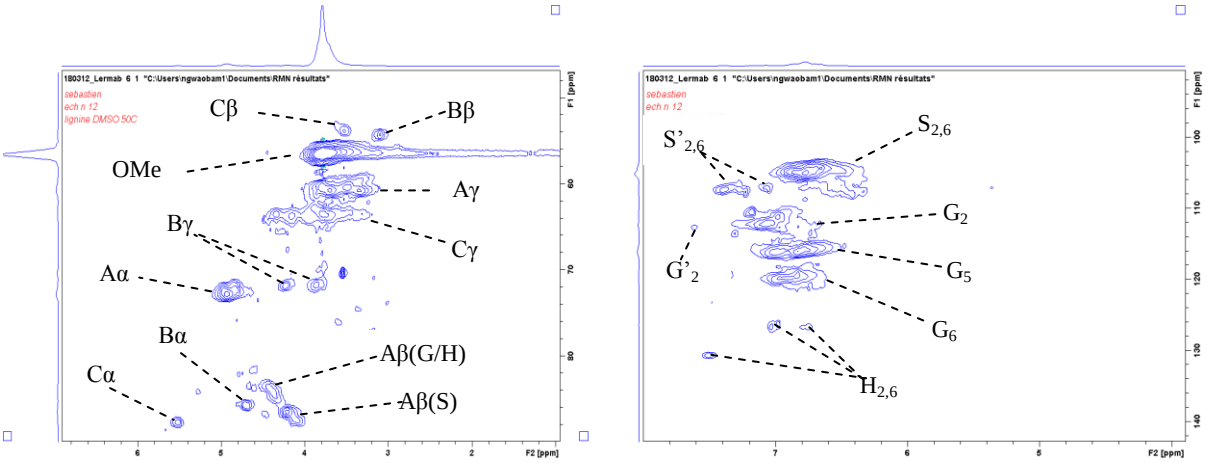
La lignine de bois explosée à différentes sévérités et extraite à l'éthanol est étudiée par Spectroscopie de Cohérence Magnétique Hétéronucléaire (HSQC). Cette technique permet de caractériser et quantifier les principales liaisons inter-monomériques (fig.2). Dans la fig.2, les principales corrélations attendues pour une lignine de feuillues sont observées : les liens β-O-4, phénylcoumarane et ββ résinol. À des fins de quantification, l'intensité du signal de $C_{\beta}H$ est liée à l'intensité de la C_2H aromatique présente, à la fois dans les unités guaiacyle et syringyle (Li et al., 2007). Les intégrales de références sont :

- Pour le Guaiacyl $C_{\beta}H$ **85,5/4,33** et C_2H **108-114/6,4-7,5**
- Pour le Syringyl $C_{\beta}H$ **86,0/4,20** et C_2H **102-108/6,0-7,5**
- La teneur en β-O-4= $\frac{intégral\ de\ C\beta H}{\Sigma intégral\ de\ C2H}$ (2)

Concernant l'imprégnation à l'eau avant explosion à la vapeur, les résultats de ces calculs montrent une diminution linéaire des structures β-O-4 avec la sévérité du traitement (fig.3). En accord avec les données de la littérature on constate donc une dépolymérisation progressive des liens β-O-4 avec une augmentation de la sévérité du traitement d'explosion à la vapeur.

Par contre lors de la catalyse acide cette dépolymérisation est beaucoup plus rapide passant de 16,0% à 0,0 % de liaisons entre 1,4 et 2,5 de sévérité contre 29,9% et 0,2% de liaisons β-O-4 entre 3,4 et 4,1. Par rapport au données de la littérature, une concentration importante en unité S' est observée pour la lignine d'okoumé explosé à la vapeur. L'unité S' est une unité syringyle oxydée, portant une fonction C=O sur la position α de la chaine latérale. On constate également que la production des unités S' semble évoluer en fonction de la sévérité. La formation de S' pourrait être à corréler avec les mécanismes de délignification intervenant durant l'explosion à la vapeur. Ce point sera à approfondir dans la suite de notre travail

La chromatographie d'exclusion stérique qui permet de mettre en évidence la polymolécularité c'est-à-dire le degré de polymérisation de la lignine permettra aussi de mieux comprendre le comportement de la lignine (dépolymérisation/repolymérisation) et améliorer d'extractabilité de la lignine.



Chaine latérale Chaine aromatique

Fig.2 : Spectre 2D – HSQC des zones aliphatiques et aromatique de la lignine de bois explosé

A=β-O-4 ; Cα-Hα=Aα ; Cγ-Hγ=Aγ; β-β=B ; β-5=C.

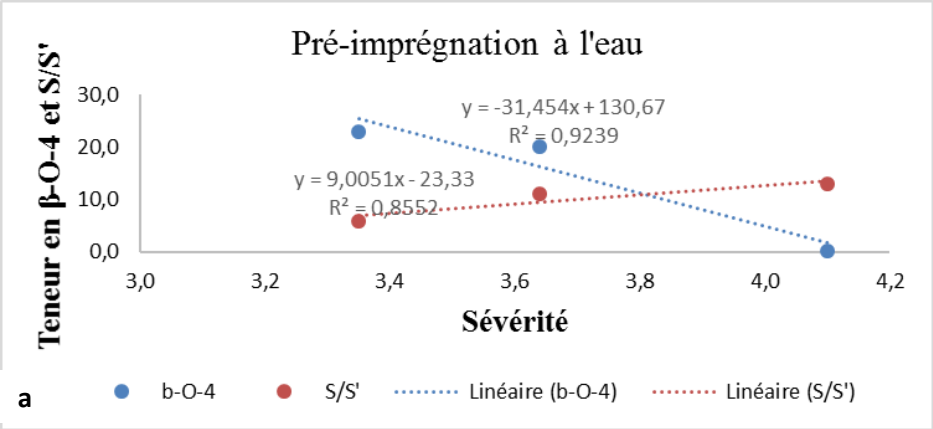


Fig.3 : Quantité de liaisons β-O-4 et des rapports S/S'dans la lignine de bois explosé en milieu neutre en fonction de la sévérité du traitement.

Références

Brownell, H.H., Yu, E.K.C., Saddler, J.N. (1986) Steam-explosion pretreatment of wood: Effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop, Biotechnology and Bioengineering, 28, 792–801.

Grous, W.R., Converse, A.O., Grethlein, H.E. (1986) Effect of steam explosion pretreatment on pore size and enzymatic hydrolysis of poplar, Enzyme Microbiology and Technology, 8, 274–280.

Holtzapple, M.T., Humphrey, A.E., Taylor, J.D. (1989) Energy requirements for the size reduction of poplar and aspen wood, Biotechnology Bioengineering, 33, 207–210.

Li, J., Henriksson, G., Gellerstedt, G. (2007) Lignin depolymerization/repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion, Bioresource and Technology, 98, 3061–3068.

Sawada, T., Nakamura, Y. (2001) Low energy steam explosion treatment of plant biomass, Chemical Technology and Biotechnology, 76, 139–146.

Poster D03

Le modèle de poutre sur fondation comme méthode alternative au dimensionnement des assemblages bois de type tiges

LEMAITRE Romain[1], BOCQUET Jean-François[1], BADER Thomas[2], SCHWEIGLER Michael[2]

[1]ENSTIB/LERMaB, Université de Lorraine, 88000 Épinal
[2]Department of Building Technology, Linnaeus University, Växjö, Sweden
romain.lemaitre@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Eurocode 5, assemblage, modélisation, rigidité

Contexte et objectifs

L'optimisation des processus de fabrication a rendu possible la production de produits bois de plus grandes dimensions, lesquels ont permis la réalisation d'imposants ouvrages. Dans la dernière version de l'Eurocode 5, la norme EN 1995-1-1:2004 dont la rédaction a été réalisée dans les années 1990, il a semblé important aux rédacteurs de proposer des formules pour estimer les raideurs d'assemblages en accord avec les besoins de l'époque et en conscience avec le saut technique que cela impliquait pour les futurs utilisateurs du code. Cependant, ces règles de dimensionnements simples deviennent maintenant insuffisantes pour faire face aux défis technologiques actuels : les bâtiments bois de grandes hauteurs. Dans l'Eurocode 5, le calcul de la capacité résistante d'un assemblage de type tige est basé sur la théorie de l'analyse limite proposée par K.W. Johansen (Johansen (1949)). Cette méthodologie montre à présent des limites pour des assemblages complexes.

Les améliorations en informatique et en mécanique numérique rendent aujourd'hui possible l'utilisation d'approches numériques prenant en compte les comportements non linéaires des matériaux. La complexité de la déformation locale et de l'état de contrainte du bois autour de l'organe amène à utiliser une approche phénoménologique au lieu d'une modélisation de milieu continu. Dans ce travail, l'approche retenue est une approche discrète où le contact est idéalisé par une poutre non linéaire sur des ressorts non linéaires. Ce type de modèle est appelé poutre sur fondation, beam-on-foundation en anglais (dans la suite l'acronyme BOF sera utilisé). Cette approche n'est pas nouvelle pour les assemblages bois, il a été développé par T. Hirai (Hirai (1983)). Elle est restée inutilisée en pratique à cause de son implémentation complexe et son temps de calcul élevé à l'époque de son élaboration. Les comportements non linéaires des ressorts sont définis par des fonctions mathématiques appropriées (voir Schweigler et al (2018). L'objectif de ce travail est de comparer la capacité résistante et la rigidité de différentes configurations d'assemblages bois issues du modèle BOF avec les résultats analytiques de l'Eurocode 5.

Matériel et méthode

Un modèle de poutre non linéaire sur fondation linéaire en deux dimensions a été développé (voir Fig. 1). Ce modèle BOF est composé d'éléments poutres élastoplastiques représentant l'organe en acier. Un module de Young de l'organe égal à 210 GPa et une limite élastique égale à 240 MPa (f_y) ont été utilisé. Le moment d'écoulement plastique M_y inclus dans les équations de Johansen de l'Eurocode 5 est pris égal à celui théorique pour une poutre ayant une section circulaire. Le comportement non linéaire des éléments composant la tige est défini par une relation moment-courbure, laquelle permet de définir une nouvelle rigidité de flexion

de la tige à chaque pas de calcul (égal à 0,02 mm). Les ressorts utilisés pour modéliser le contact entre le bois et la tige sont décrits par un comportement élastoplastique parfait où la limite élastique f_h est égale à l'expression empirique (8-16) de l'EN 1995-1-1:2004. Il est également défini que le comportement des ressorts reste élastique jusqu'à un millimètre d'enfoncement. Ainsi, les modules de fondation élastique et plastique sont respectivement nommés $K_{f,el}$ et $K_{f,pl}$, et respectivement égaux à f_h et zéro. La distance entre les ressorts est égale à 0,4d.

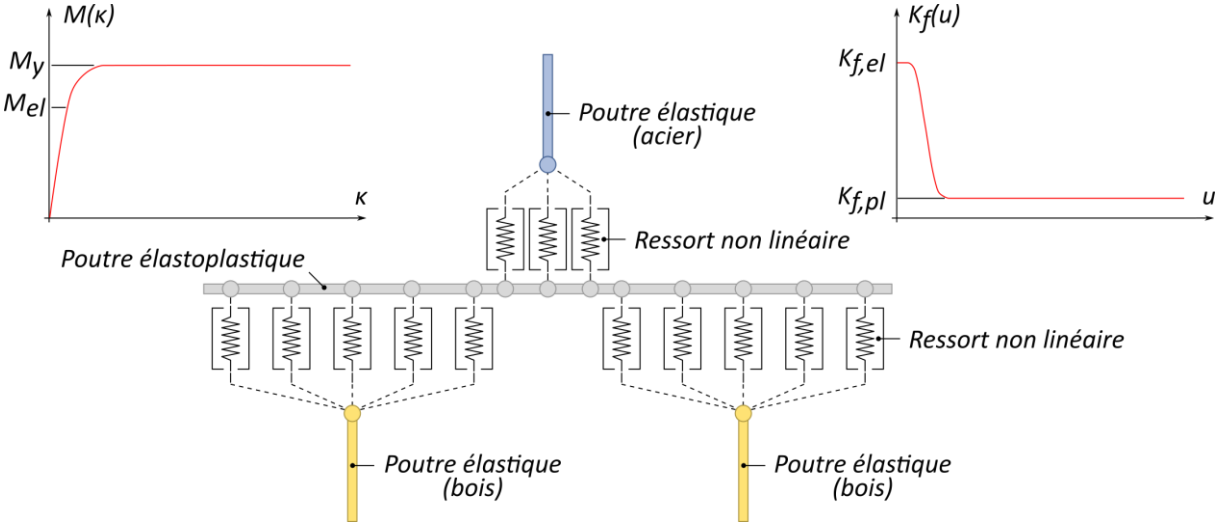


Fig. 1 : Description du modèle en deux dimensions de poutre sur fondation retenu pour l'étude (exemple d'un maillage d'un assemblage bois-métal à deux plans de cisaillement).

Les jeux de paramètres ont été choisis pour englober tous les modes de ruptures définis dans l'Eurocode 5 (voir les figures 8-2 et 8-3 de l'EN 1995-1-1:20004) pour des assemblages à deux plans de cisaillement :

- diamètre de l'organe d dans {8 mm; 16 mm; 24 mm} ;
- élancement de l'assemblage t/d dans {1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 6; 7; 8; 9; 10} où t est l'épaisseur des éléments bois ;
- densité du bois ρ dans {420 kg/m^3} ;
- limite élastique de l'organe f_y dans {240 MPa}.

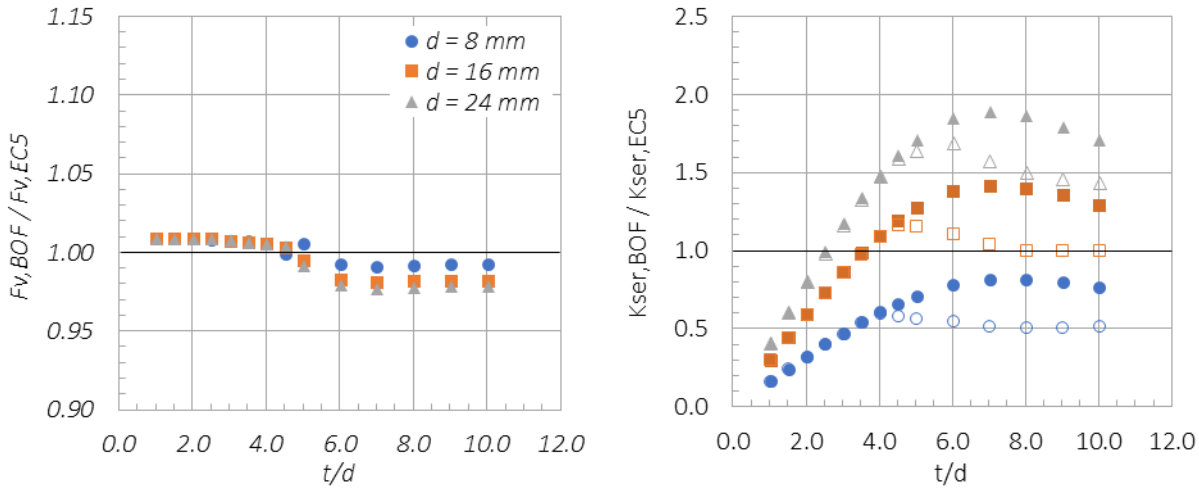
Trois configurations d'assemblages ont été retenues :

- configuration A : bois-métal, avec des plaques métalliques épaisses latérales ;
- configuration B : bois-métal, avec une plaque métallique en âme ;
- configuration C : bois-bois.

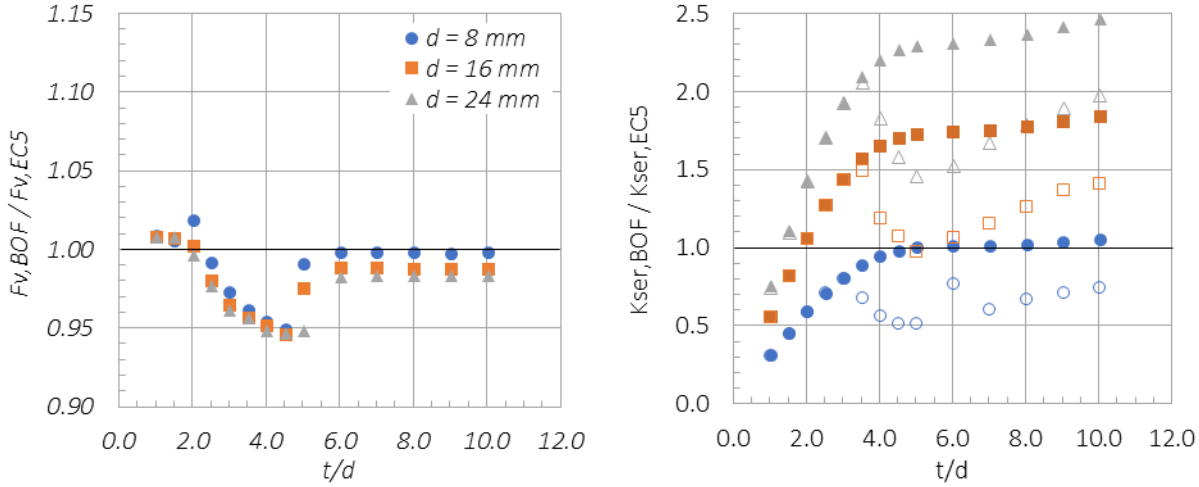
Résultats

Les résultats sont regroupés dans les différents graphiques de la figure 2, où chaque point représente le rapport : résultat numérique (du modèle BOF) sur résultat analytique (de l'Eurocode 5). Pour la rigidité, les rapports montrent une évolution avec l'élancement t/d et une dépendance non linéaire du diamètre de l'organe. Pour la capacité résistante définie à cinq millimètres de glissement, les résultats numériques sont en accord avec ceux calculés par l'Eurocode 5. Pour le mode avec une rotule plastique dans l'organe, quelle que soit la configuration et le diamètre, les rapports sont inférieurs à 10%. Pour les modes de rupture sans rotule plastique ou avec plus d'une rotule plastique, quelle que soit la configuration et le diamètre d'organe, les rapports sont inférieurs à 3%.

Configuration A



Configuration B



Configuration C

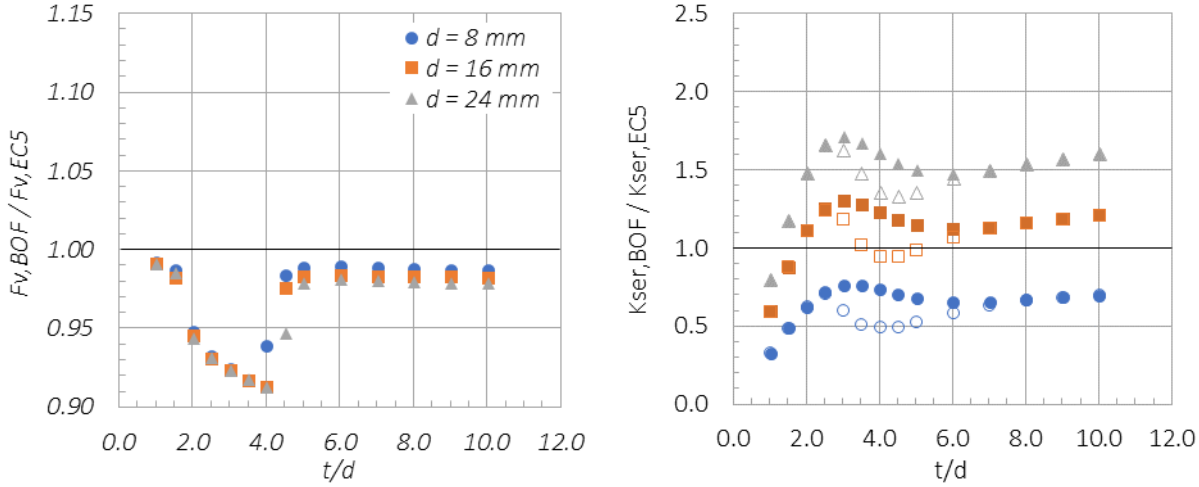


Fig. 2 : Comparaison des capacités résistantes F_v et des modules de glissement K_{ser} de l'Eurocode 5 avec ceux issus du modèle BOF pour les trois configurations d'assemblages.

Conclusion et perspectives

Les calculs numériques du modèle BOF et leur comparaison avec les équations de dimensionnement de l'Eurocode 5 mettent en évidence la validité de la méthode et l'avantage du modèle. Les effets qui ne sont pas explicitement couverts dans les équations empiriques du code de calcul, à savoir l'influence de l'élancement t/d et la non linéarité du diamètre de l'organe sur le module de glissement, ont été montrés.

L'émergence de nouveaux produits techniques à base de bois ou d'assemblages complexes ne sont pas couverts par l'Eurocode 5 (CLT, renforcement par contreplaqué, assemblages multiplans, etc.). La modélisation BOF peut également compléter les manques de l'Eurocode 5 pour ces types d'assemblages. Il se veut donc être un outil universel et plus précis pour estimer le comportement mécanique des assemblages bois : capacité résistante, distribution des efforts et rigidité.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action COST FP1402 « Basis of structural timber design - from research to standards ». De plus, ce travail est un résumé d'un article présenté à la 5ème conférence internationale INTER ayant eu lieu à Tallin (Estonie) en août 2018.

Références

EN 1995-1-1:2004, Design of timber structures - Part 1-1: General and rules for buildings. CEN.

Johansen, K.W. (1949) Theory of Timber Connections, International Association for Bridge and Structural Engineering (ABSE) Pub. 9, 249-262.

Hirai, T. (1983) Non-linear load-slip relationship of bolted wood-joints with steel side members –II – Application of the generalised theory of beam on elastic foundation. Makusu Gakkaishi, Vol. 29, No. 12, pp 839-844

Schweigler, M., Bader, T.K., Hochreiner, G., Lemaître, R. (2018) Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic behaviour of wood. Composites Part B: Engineering, 142:142-158.

Poster D04

Imagerie hyperspectrale et chimie du bois produit sous contrainte hydrique et minérale

CHAIX Gilles[1,2,3], PIRES FRANCO Mariana[3], TOMAZELLO FILHO Mario[3], CHAMBI LEGOAS Roger[3], GORRETTA Nathalie[4], PASQUINI Celio[5], VIDAL Cristiana[5], ROGER Jean-Michel[4]

[1] CIRAD, UMR AGAP, 34395 Montpellier, Cedex 9, France
[2]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France
[3]Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiroz », LAIM, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, CP 9, Piracicaba-SP, Brasil
[4] IRSTEA, UMR ITAP, Avenue JF Breton, 34398 Montpellier, France
[5] UNICAMP, Department of Analytical Chemistry, Chemistry Institute, Campinas, Brasil
gilles.chaix@cirad.fr

Mots clefs : densité ; Eucalyptus ; Proche infrarouge ; chimie ; contrainte hydrique ; Brésil

Contexte et objectifs

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à l'impact des changements climatiques sur le développement des arbres forestiers, en particulier l'Eucalyptus au Brésil. Il s'agit d'étudier le développement d'arbres (*Eucalyptus grandis*) ayant été soumis à différentes contraintes hydrique et minérale par rapport aux conditions normales de sylviculture industrielle (Battie-Laclau et al. 2014). En plus des données sur la croissance, la biomasse aérienne et souterraine, les flux de sève, l'anatomie du bois et sa densité, nous considérons les conséquences des contraintes environnementales sur la formation du bois et donc sur sa qualité. L'objectif alors est d'évaluer les propriétés chimiques du bois, comme les teneurs en extraits totaux et lignine, afin de mettre en évidence leur distribution spatiale, conséquence de la mise en place des tissus ligneux et des processus duraminisation.

Matériel et méthode

En spectroscopie proche infrarouge (SPIR), des modèles de régression PLS sont établis à partir des spectres d'absorbance acquis en réflexion diffuse et des données de références d'un lot d'échantillons d'étalonnage, puis validés sur un lot externe. Ensuite, ces modèles sont utilisés pour prédire les propriétés considérées à partir seulement des spectres acquis sur de nouveaux échantillons à prédire (Fig. 1). Les travaux présentés ici portent sur un dispositif expérimental d'exclusion partielle des pluies installé avec des *E. grandis* à l'ESALQ-USP, Station Itatinga, Brésil (Battie-Laclau et al., 2014, Fig. 2). Nous avons récolté des disques de bois sur 54 arbres abattus à l'âge de 5 ans (15-20 m de hauteur). Pour chaque disque, nous avons acquis une image au moyen d'une caméra HSI (SPECIM, 900 - 2500nm, dimension des pixels 625x625µm).

Le défi ici est de tenter de transférer nos étalonnages d'un appareil (Vector, Bruker, 12500-3800 cm^{-1}) construits sur les spectres acquis en réflexion diffuse à un autre appareil (caméra HSI) au moyen d'échantillons mesurés sur les deux appareils (Nouri et al. 2016, Fig. 3).

Résultats et discussion

Le transfert d'étalonnage s'est avéré efficace. Le modèle ainsi établi pour la caméra présente une erreur de prédiction de 10.3% comparée à l'erreur de mesure de 11.6%. Nous avons alors

prédit les teneurs des disques de bois en extractibles totaux à partir de leurs images dans le proche infrarouge (Fig. 4-1).

Les images des teneurs chimiques prédites sur des disques de bois nous permettent de comparer leurs distributions selon les conditions de croissance, contraintes ou non. Par exemple, en l'absence ou non de fertilisation, les arbres ayant subi un stress hydrique plus important (avec une réduction de pluie) présentent, pour les teneurs en extractibles totaux, une distribution de la moelle à l'écorce plus hétérogène (Fig. 4-2) et un taux moyen plus élevé (Fig. 3).

Conclusions

L'imagerie hyperspectrale, associée aux méthodes de transfert d'étalonnage ont montré ici tout leurs intérêts d'une part pour exploiter les étalonnages existants sans être obligé de reprendre tous les échantillons et décrire la variabilité spatiale des propriétés chimiques sur des disques du bois.

En perspective, ces données vont nous permettre d'étudier et d'affiner les connaissances sur le fonctionnement du cambium selon les variations climatiques en croisant variabilité des données chimiques, micro-densité du bois estimée aux rayons X, et rythme de croissance du tronc mesuré au moyen de dendromètres de précision.

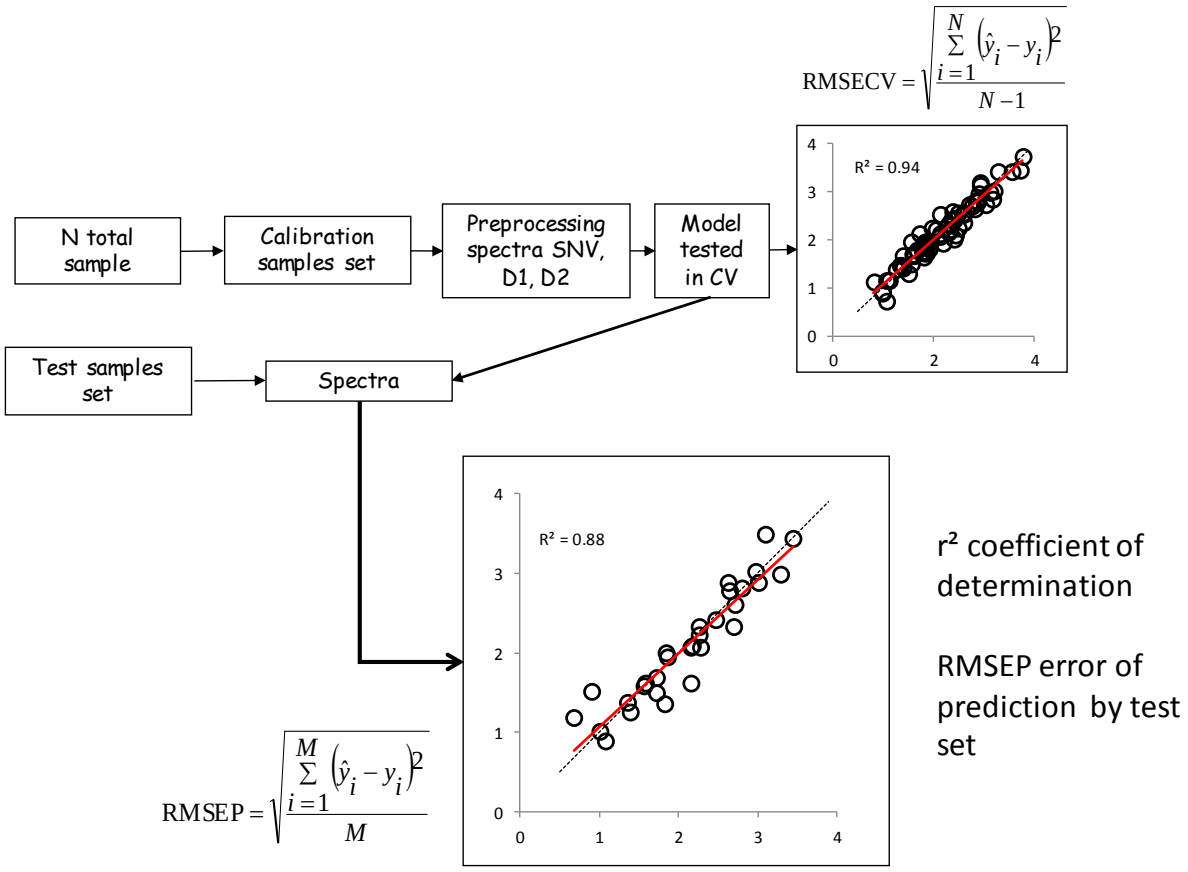


Fig. 1 : Etablissement de modèle de prédiction en spectroscopie proche infrarouge

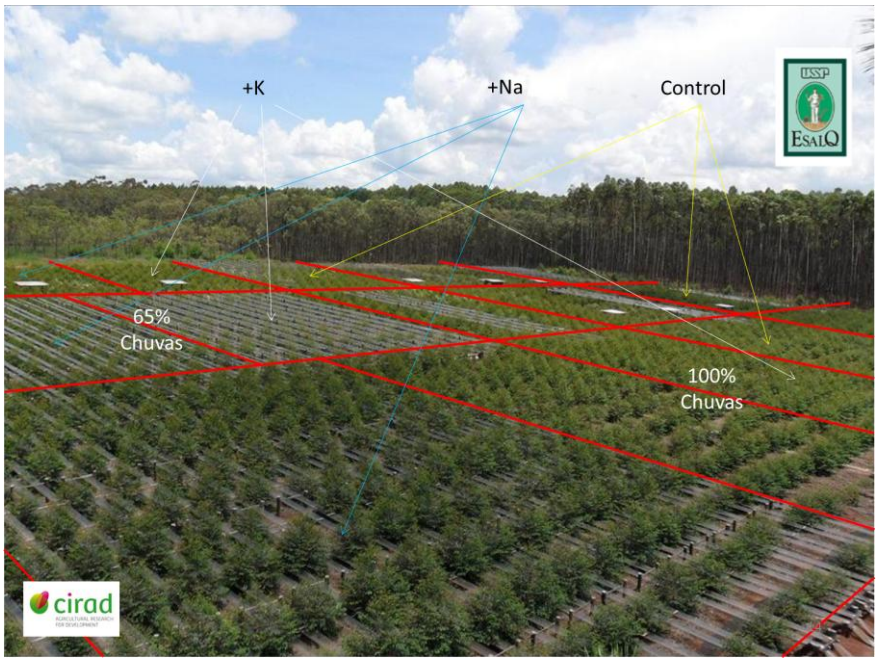


Fig. 2 : dispositif expérimental d'exclusion partielle des pluies installé avec des E. grandis à l'ESALQ-USP, Station Itatinga, Brésil (Photo : JP Laclau)

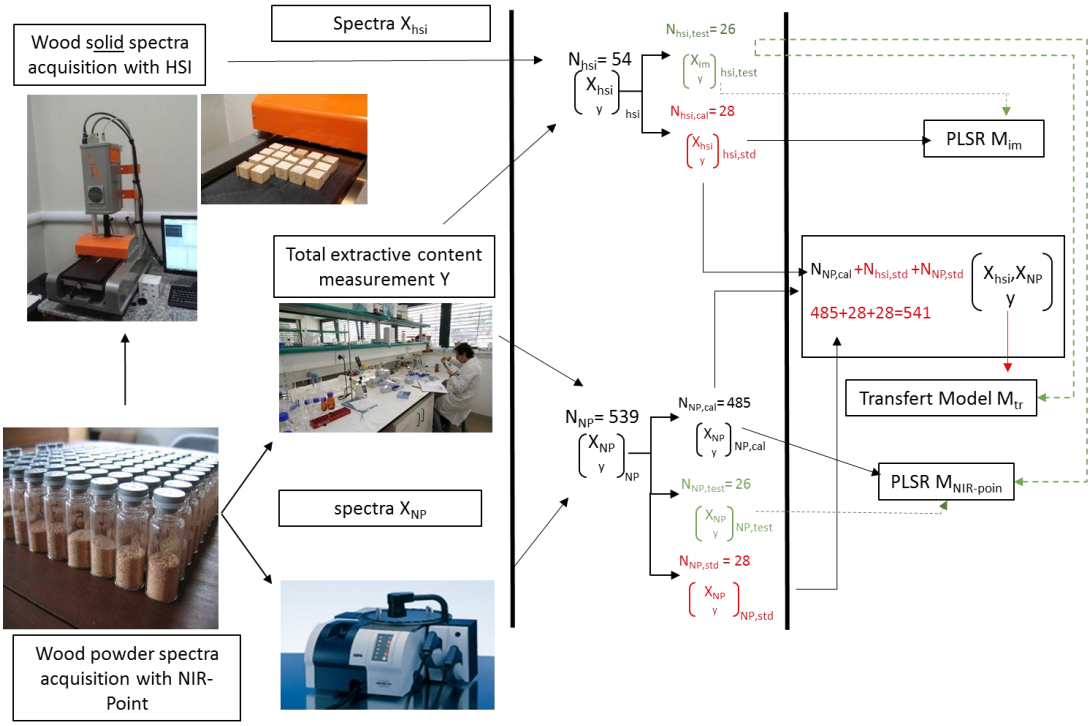


Fig. 3 : Principe de transfert d'étalonnage entre deux appareils (d'après Nouri et al. 2016)

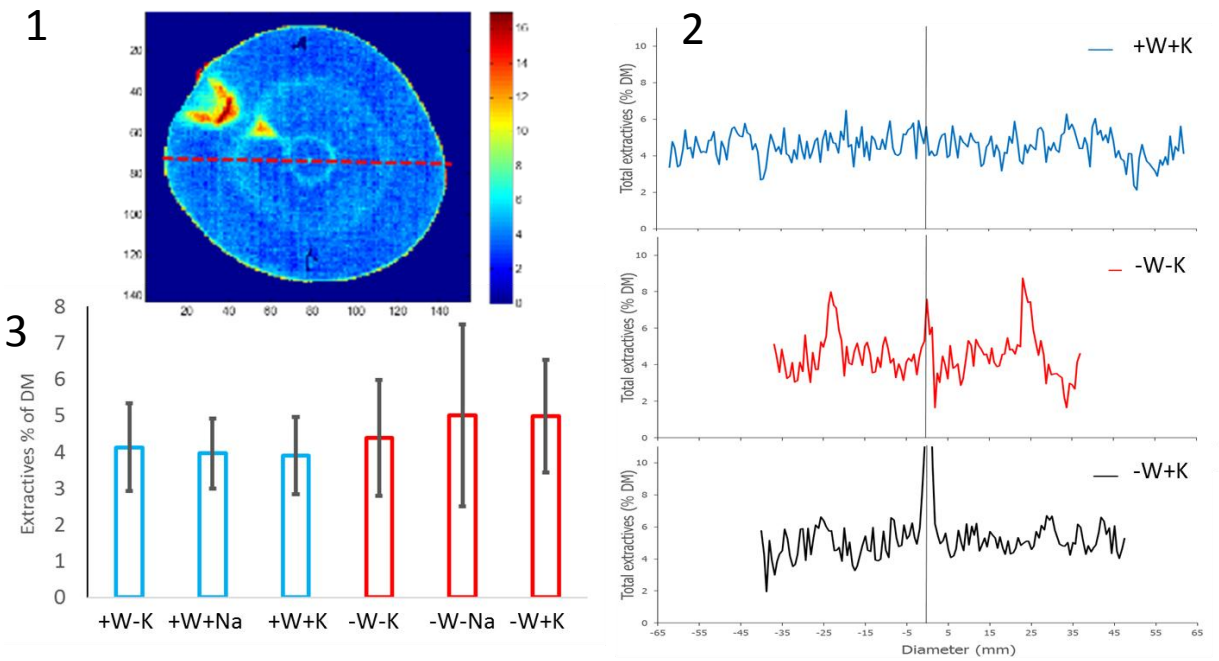


Fig. 4 : (1) Distribution spatiale des teneurs en extraits totaux sur un disque de bois, (2) profils de variabilité des teneurs en extraits totaux sur 3 disques de bois, et (3) teneur moyenne par conditions de croissance (+W = 100 des pluies, -W = 65% des pluies, +K/-K apport ou non de fertilisation potassique, +Na/-Na apport ou non de fertilisation sodique)

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au CIRAD à travers l'obtention de bourse d'accueil à Montpellier de M. Pires Franco, la CAPES associée COFECUB dans le cadre du projet Sv 846/15, la CAPES associée à Agropolis Fondation pour le projet ID 1203-003 à travers le programme « Investissements d'avenir » (Labex Agro:ANR-10-LABX-0001-01), la FAPES à travers e projet 2013/256-5 et enfin J-P. Laclau de l'UMR Eco&Sols pour nous avoir donné accès à l'expérimention.

Références

Battie-Laclau P, Laclau JP, Domec JC, Christina M, Bouillet JP, de Cassia Piccolo M, de Moraes Goncalves JL, e Moreira RM, Krusche AV, Bouvet JM, Nouvellon Y (2014) Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations, New Phytol, 203 (2), 401-413

Nouri M., Gomez C., Gorretta N., Roger J.M. 2016, Clay content mapping from airborne hyperspectral Vis-NIR data by transferring a laboratory regression model, Geoderma, 298, 54–66

Poster D05

Durabilité naturelle : comparaison des essais en laboratoire et des essais au champ basés sur des espèces de bois de Madagascar

RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], RAZAFINARIVO Ravo Nantenaina Gabriella[1], RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo [1], RAJEMISON Andraina [1], THÉVENON Marie-France [2,3], BELLONCLE Christophe[4], CHAIX Gilles [5,6,7], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1]

[1]Université d'Antananarivo, Antananarivo 101, Madagascar
[2]CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France
[3]BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
[4]Ecole Supérieure du Bois, Nantes, France
[5]CIRAD - UMR AGAP, Montpellier, France
[6]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France
[7]ESALQ-USP, Wood Anatomy & Tree-Ring Lab, Piracicaba, Brazil
andriambelo.radonirina@gmail.com

Mots clefs : durabilité naturelle, perte de masse, indice de conservation, essai en laboratoire, essai au champ, bois, Madagascar

Contexte et objectifs

Les propriétés de bois de moins de 10% des espèces malgaches seulement ont été caractérisées alors qu'il existe plus de 4000 espèces de bois recensées à Madagascar (Rakotovao et al. 2012, Ramananantoandro et al. 2015). Parmi les propriétés de bois les moins connues figure la durabilité naturelle. En effet, par rapport aux méthodes pour caractériser les propriétés physico-chimiques des bois, les méthodes directes standardisées utilisées au champ pour la caractériser nécessitent plusieurs années. Néanmoins, il existe des méthodes standardisées en laboratoire pour les essais de durabilité naturelle qui sont moins longues que les essais au champ. Mais ces essais en laboratoire sont effectués dans des conditions contrôlées, contrairement aux essais au champ où les conditions incontrôlées (facteurs climatiques, types d'agents biologiques de dégradation). D'où, cette étude sur la comparaison des résultats des essais de durabilité naturelle en laboratoire et au champ a été mené. Les objectifs consistent à (i) analyser la durabilité naturelle de 8 espèces de Madagascar à travers des essais de durabilité naturelle standardisés en laboratoire et au champ, et à (ii) comparer les résultats des essais en laboratoire avec ceux des essais au champ.

Matériels et méthodes

L'étude concerne huit (8) espèces issues de la forêt humide de Mandraka comprenant sept (7) espèces autochtones dont *Trilepisium madagascariense* (dipaty), *Garcinia* sp. (kijy), *Neotina coursii* (felamborona), *Agauria* sp. (angavo), *Tambourissa trichophylla* (ambora), *Nuxia capitata* (valanirana), *Weinmania rutenbergii* (lalona), et une espèce allochtone (*Cedrela odorata*). Pour analyser la durabilité naturelle, des essais en laboratoire (au CIRAD-Montpellier, France) et des essais au champ (situés sur le site d'application de l'ESSA-Antananarivo, Madagascar) ont été effectués en utilisant des méthodes directes standardisées. Les essais en laboratoire ont été effectués sur des bois délavés (suivant EN 84, 1997) et des bois non délavés en utilisant deux types de champignons (*Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor*), et suivant la norme XP Cen TS 15083-1 (2006). La durabilité a ensuite été caractérisée à travers la perte de masse. Pour les essais au champ, ils ont été effectués suivant

la norme EN 252 (1989) et c'est l'indice de conservation d'Edlund (2006) obtenu à 36 mois qui a été utilisé pour caractériser la durabilité.

Résultats et discussion

Les résultats ont montré qu'il y a une différence significative entre les pertes de masse obtenues en laboratoire (seuil de 5%) des 8 essences. Les pertes de masse pour les échantillons délavés sont supérieures à celles des échantillons non délavés, avec une différence significative (seuil 5%). Et les pertes de masses par attaque de *Coriolus versicolor* sont supérieures à celles obtenues par attaque de *Coniophora puteana*, avec une différence significative (seuil 5%). Pour les essais au champ, il y a aussi une différence significative (seuil de 5%) entre les indices de conservation des différentes espèces.

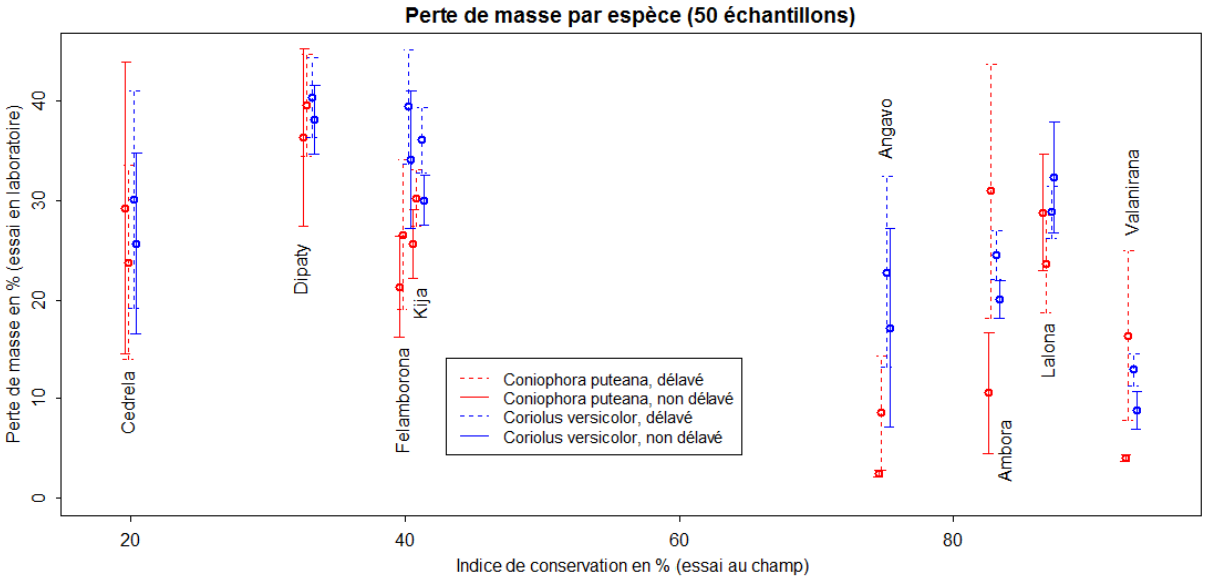


Fig. 1: Comparaison des pertes de masse en laboratoire et des indices de conservation obtenus au champ

Concernant la relation entre les essais en laboratoire et l'essai au champ, à part pour Cedrela et Lalona, les espèces avec des faibles pertes de masse en laboratoire présentent des faibles degrés de dégradation au champ (fort indice de conservation) comme le Valanirana (Fig. 1). De même, les espèces avec des fortes pertes de masse en laboratoire ont des degrés de dégradation élevés comme le Dipaty ou le Felamborana.

Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus en laboratoire sont en général conforment aux résultats obtenus au champ en condition naturelle. Ces essais au champ doivent être poursuivis pour avoir des résultats à des stades avancés de la dégradation. L'indice de conservation utilisé ici n'est qu'une appréciation qualitative visuelle de l'état de dégradation du bois. Pour les prochains travaux, pour plus de précision, il faudra se baser sur la perte de masse des échantillons utilisés dans l'essai au champ pour bien comparer les essais de durabilité au champ avec ceux en laboratoire. Et ces valeurs mesurées serviront de référence pour établir des modèles de prédiction par spectroscopie proche infrarouge afin de prédire rapidement ces propriétés sur d'autres échantillons sans passer par les méthodes de mesure directes.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au LRI, et l'AUF qui a financé le projet SPIRMADBOIS à travers lequel cette étude a été effectuée.

Références

Edlund M.L., Evans F., Henriksen K. (2006) Testing durability of treated wood according to EN 252 Interpretation of data from Nordic test fields. Nordic Innovation Centre project number : 04022 : 2-13

EN 84 (1997) Wood preservatives – Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing – Leaching procedure. European Committee for Standardisation

EN 252 (1989) Essai de champ pour déterminer l'efficacité protectrice relative d'un produit de préservation du bous en contact avec le sol, European Committee for Standardisation

Rakotovao G., Rabevohitra A.R., Collas de Chaptelperron P., Guibal D., Gérard J. (2012) Atlas des bois de Madagascar. France, Edition Quae.

Ramananantoandro T., Rafidimanantsoa H.P., Ramanakoto M.F. (2015) Forest aboveground biomass estimates in a tropical rainforest in Madagascar: new insights from the use of wood specific gravity data. Journal of forestry research, 26(1), 47–55

XP CEN/TS 15083-1 (2006): Determination of the natural durability of the solid wood against wood-destroying fungi – Test methods. Part2: Soft rotting micro-fungi. European Committee for Standardisation

Poster D06

Développer la connaissance des propriétés de bois des essences autochtones de Madagascar vers une utilisation durable des ressources locales

RAZAFINARIVO Ravo Nantenaina Gabriella[1], RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], TOMAZELLO FILHO Mario[2], CHAIX Gilles[3,4], RAZAKAMANARIVO Herintsitohaina[5], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1]

[1]Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Foresterie et Environnement, BP 175, Ankatso, 101 Antananarivo, Madagascar
[2]Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiroz », LAIM, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11 – CP 9 – Piracicaba, SP – Brasil
[3]CIRAD, UMR AGAP, 34395 Montpellier, Cedex 9, France
[4]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France
[5]Laboratoire des Radio Isotopes, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar
antenainariella@gmail.com

Mots clefs : densité ; couleur ; espèces autochtones ; variation radiale ; gestion durable ; Madagascar

Contexte

Madagascar abrite des écosystèmes variés d'une grande richesse biologique avec un niveau d'endémisme élevé. Ses forêts tropicales humides constituent un centre de biodiversité et une ressource de bois utilisés par la population Malagasy (GISC, 2009). Pourtant, sa couverture ne cesse de diminuer en raison des pressions anthropiques qui pèsent sur ces forêts : la culture sur brûlis, l'exploitation abusive. Avec ses 4220 espèces forestières existantes (MEF, 2009), une faible proportion a déjà fait l'objet de caractérisation des propriétés de bois : environ 187 espèces (Rakotovao et *al.*, 2012). Une raréfaction des essences, comme le palissandre, le bois de rose, le bois d'ébène qui sont les plus prisées et demandées au niveau du marché tant local qu'international a été constaté ces dernières années. La pression sur ces essences est forte étant donné qu'elles sont connues et appréciées et que les autres espèces ne sont pas connues en termes de qualité de leurs bois et usages. Ainsi, l'acquisition des connaissances détaillées portant sur les propriétés du bois et leurs interrelations créera une base solide pour la mise en œuvre de concepts de gestion durable des forêts.

La plupart des propriétés physiques et mécaniques, facteurs déterminant de l'aptitude des bois à diverses utilisations, sont liées à la densité (Magcale-Macandog et *al.*, 2005; Chave et *al.*, 2009a; Kiaei et *al.*, 2016; Longuetaud et *al.*, 2016). Sa facilité de mesure en fait un critère qualitatif de choix. La densité du bois constitue le premier critère de préférence des consommateurs malgaches dans le choix des bois suivie de la couleur (Ramananantoandro et *al.*, 2013). Ces propriétés varient suivant les espèces, entre individus de la même espèce, au sein du même arbre en relation avec la localisation et les fonctionnalités du bois dans l'organisme (Chave, 2006; Fournier et *al.*, 2013; Nogueira et *al.*, 2008a). Dans cette étude, cette variabilité a été évaluée sur le plan radial.

Matériels et méthodes

Des carottes de bois et disques ont été collectées sur 60 espèces des forêts tropicales humides de Madagascar. La densité a été mesurée à partir des fines bandelettes diamétrales issues de

ces carottes, par microdensitométrie à rayons X. La mesure des paramètres de couleur a été réalisée à l'aide du spectrophotomètre portable CM-2500d de Konica Minolta utilisant le système de couleur CIEL*a*b* (CIE en 1976), illuminant standard 65°, observateur standard supplémentaire 10°. La couleur du bois a été mesurée sur la section transversale des carottes de bois à des points équidistants de 1 cm.

Résultats et discussion

La densité moyenne des 60 espèces étudiées se rangent entre 0,581 $g.cm^{-3}$ à 1,038 $g.cm^{-3}$. Ce sont des espèces à bois mi-lourds à très lourds qui correspondent aux préférences des consommateurs malgaches (Ramananantoandro et *al.*, 2013). Ces valeurs montrent une diversité de potentialités que peuvent avoir ces espèces dans la définition de leurs usages.

La clarté du bois diminue quand sa densité augmente (r^2=-0,256, $p<0,01$). Cette corrélation est faible mais significative, ce qui montre que les bois denses tendent vers une couleur sombre. Cela corrobore avec les résultats trouvés sur d'autres bois tropicaux (Sotelo Montes et *al.*, 2008). Quant aux variables chromatiques a* et b*, elles sont corrélées positivement et significativement avec la densité du bois (respectivement r^2=0,460 et r^2=0,315, $p<0,01$). L'obtention des valeurs chromatiques du bois de ces espèces constitue une information objective sur la couleur du bois car une base de données contenant des informations de couleur appropriées serait utile pour définir les utilisations des ressources en bois non utilisées (Nishino et *al.*, 1998).

Conclusion et perspectives

La connaissance de ces propriétés du bois permettrait d'avancer dans la recherche des espèces de substitution aux bois nobles du pays non seulement pour répondre aux besoins de la population locale mais aussi pour mieux s'ouvrir au niveau des marchés internationaux. En outre, avec la SPIR (Spectroscopie Proche Infrarouge), un outil innovant non destructif et peu onéreux, ces valeurs de densité et de couleur de bois issues de la méthode standard au laboratoire serviront de valeurs de référence en vue de développer des modèles d'étalonnage pour estimer les propriétés d'autres espèces de bois malgaches.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'AUF, l'ESPA, le CIRAD, le LAIM/ESALQ-USP et l'OWSD.

Références

Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Amy, E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, *12*, 351–366. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x

GISC. (2009). *Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar : Projet d'appui à la gestion durable de l'environnement et des écosystèmes forestiers à Madagascar*.

Kiaei, M., Naji, H. R., Abdul-Hamid, H., & Farsi, M. (2016). Radial variation of fiber dimensions, annual ring width , and wood density from natural and plantation trees of Alder. *Wood Research*, *61*(1), 55–64.

Longuetaud, F., Mothe, F., Fournier, M., Dlouha, J., Santenoise, P., & Deleuze, C. (2016). Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species : a case

study on three hardwood and two softwood species. *Annals of Forest Science*. https://doi.org/10.1007/s13595-016-0555-4

Magcale-Macandog, D. B., Delgado, M. E. M., & Alipon, M. A. (2005). Wood Density of Tropical Tree Species in the Philippines : State of Knowledge and Database Development for Tree Biomass Estimation. *Journal of Tropical Forest Science*, *17*(3), 474–478.

MEF. (2009). *Quatrième rapport national de la Convention sur la Diversité Biologique - Madagascar*.

Nishino, Y., Janin, G., Chanson, B., Détienne, P., Gril, J., & Thibaut, B. (1998). Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *Journal of Wood Science*, *44*, 3–8. https://doi.org/10.1007/BF00521867

Rakotovao, G., Rabevohitra, A. R., Collas de Chatelperron, P., Guibal, D., & Gérard, J. (2012). *Atlas des bois de Madagascar*.

Ramananantoandro, T., Ramanakoto, M. F., Rajemison, A. H., & Eyma, F. (2013). Relationship between density and aesthetic attributes of wood and preference of Malagasy consumers. *Annals of Forest Science*, *70*(6), 649–658. https://doi.org/10.1007/s13595-013-0299-3

Sotelo Montes, C., Hernández, R. E., Beaulieu, J., & Weber, J. C. (2008). Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of Calycophyllum spruceanum at an early age in the Peruvian Amazon. *New Forests*, *35*(1), 57–73. https://doi.org/10.1007/s11056-007-9060-9

Poster D07

Potentialités de la spectroscopie proche infrarouge comme aide à l'identification des bois de l'Annexe II de la CITES : cas de quatre espèces de Dalbergia de Madagascar

RAOBELINA Andry Clarel[1], RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], CHAIX Gilles[2, 3, 4], RAVAOMANALINA Bako Harisoa[5], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1]

[1]Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Eaux et Forêts
[2]Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiroz », LAIM, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11 – CP 9 – Piracicaba, SP – Brasil
[3]CIRAD, UMR AGAP, 34395 Montpellier, Cedex 9, France
[4]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France
[5]Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Mention Biologie et Ecologie Végétales
ramananantoandro@gmail.com

Mots clefs : bois de rose; Dalbergia; identification; palissandre; SPIR

Contexte et objectifs

On assiste actuellement à l'accroissement du trafic illégal de bois précieux dans les pays tropicaux. Ces trafics concernent entre autres les bois de Dalbergia qui sont aujourd'hui classés en Annexe II de la CITES. La lutte contre ces trafics nécessite la mise en place d'outils de traçabilité et d'identification du bois. Si la discipline de l'anatomie du bois est bien reconnue, elle nécessite une connaissance scientifique de la part de l'agent de contrôle. L'établissement d'un outil fiable, non destructif et rapide, tel qu'un spectromètre infrarouge proche (SPIR) étalonné, peut aider les agents de contrôle à identifier les espèces de bois et à assurer leur exploitation légale et durable.

Plusieurs outils SPIR existent sur le marché. Les spectromètres PIR classiques de laboratoire sont trop onéreux pour les laboratoires de pays en développement. L'objectif de cette présentation est d'analyser le potentiel de la spectromètre PIR portatif pour discriminer les espèces de Dalbergia et de Diospyros.

Matériel et méthode

Des échantillons de bois de ces espèces ont été prélevés dans les régions Diana et Boeny à Madagascar. Des spectres en proche infrarouge ont été prélevés sur 36 carottes de bois, appartenant aux espèces : *Dalbergia abrahamii, Dalbergia chlorocarpa, Dalbergia greveana, Dalbergia pseudobaronii,* en utilisant un spectromètre portable VIAVI MicroNIR. Quatorze carottes de bois de *Diospyros* sp. ont aussi été rajoutées à l'étude pour analyser les potentialités de la SPIR pour discriminer les 2 genres. Les spectres ont été acquis à la fois sur l'aubier et sur le duramen. Les modèles de discrimination ont été établis et évalués en testant différents prétraitements.

Premiers résultats

Le meilleur prétraitement des spectres qui a donné le minimum d'erreur de classification est la « dérivée seconde avec une largeur de fenêtre glissante de 9 points ». En validation indépendante, les erreurs de classifications sont les suivantes : (i) pour la discrimination des

deux genres : 7,7%, pour le duramen et 12.9% pour l'aubier, (ii) pour la discrimination des quatre espèces de Dalbergia : 20.0% pour le duramen et 36,4% pour l'aubier.

La qualité des modèles établis dans cette étude sont conformes à la littérature. Le spectromètre proche infrarouge MicroNIR Viavi peut donc être utilisé comme complément de méthode d'identification des bois, avec comme avantage la rapidité de l'identification et la non nécessité de connaissance particulière de la part de l'utilisateur.

Conclusion et perspectives

Pour le futur, il est recommandé d'augmenter le nombre de répétitions d'arbres par espèce. L'objectif in fine sera d'identifier toutes les espèces de Dalbergia existantes à Madagascar (soit 48 espèces) et les espèces de Diospyros (une centaine), ou tout du moins les espèces atteignant le diamètre minimum d'exploitabilité (DME).

Cette présentation est novatrice dans le sens où c'est la première étude qui utilise la SPIR pour discriminer les bois précieux malgaches. Elle a pour ambition de présenter une approche qui est adaptée au contexte des pays en développement dans le sens où : (i) nous avons utilisé un outil PIR moins onéreux que l'outil classique de laboratoire et portatif ; (ii) de plus, nous avons utilisé le logiciel en ligne et gratuit de chimiométrie «ChemFlow » (https://chemproject.org/wakka.php?wiki=ChemFlow) au lieu d'utiliser un logiciel payant.

Remerciements

Les auteurs remercient la Coopération Allemande au Développement via le Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement (PAGE/GIZ) pour avoir financé ce travail, l'équipe du Missouri Botanical Garden (MBG) pour avoir assuré la collecte des échantillons de bois sur terrain et l'équipe de BIODEV et SAVAIVO pour leur accompagnement durant les travaux de terrain.

Poster D08

Etude de la transformation de produits connexes de bois et plastiques/polystyrène expansé en matériaux sandwich autoadhésifs

AMADJI Togbé Armel[1], ADJOVI Edmond Codjo[1], GUYOT Alban[2], GERARD Jean[2]

[1] Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, BP 234 Abomey-Calavi, Bénin
[2]Unité de Recherche Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits (BioWooEB), CIRAD, France
amadjitarmel@gmail.com

Mots clefs : produits connexes, plastiques, polystyrène, sciure, bois, matériau sandwich

Contexte

Comme d'autres pays voisins d'Afrique de l'Ouest, le Bénin produit de très importantes quantités de produits connexes issus de la transformation du bois, principalement des sciures qui sont éliminées sans aucune valorisation. Durant ces dernières années, la quantité annuelle de produits connexes éliminés par les entreprises du bois béninoises a dépassé en moyenne 4500 tonnes (DGFRN, 2016). Ces produits ne sont pas éliminés ni recyclés de façon écologique : la sciure produite est essentiellement mise au rebut au voisinage des unités de transformation ou brûlée à des fins domestiques. Cette importante production de sciures est une des résultantes de la pression anthropique exercée sur les ressources en bois des forêts du pays. Alors que le Bénin n'est pas un pays producteur de bois d'œuvre à grande échelle, cette pression se caractérise par une exploitation forestière sélective et incontrôlée à l'origine d'une raréfaction de certaines essences (Agbahungba et al., 2001).

Par ailleurs, les collectivités locales sont confrontées à un problème d'élimination et de gestion des matières plastiques et de polystyrène expansé d'emballages qui encombrent l'environnement en milieu urbain. En 2012, plus de 12 000 tonnes de déchets plastiques, dont plus de la moitié formée de sachets d'emballage, ont été produits (Dessau S., 2012). L'élimination incontrôlée de ces déchets, souvent brûlés à ciel ouvert, constitue une menace sérieuse pour l'environnement et sont néfastes à la santé de l'homme et de tous les êtres vivants en général (Gildas, 2014).

Dans un tel contexte, il est apparu opportun de concevoir et mettre au point un procédé de transformation combinée de ces déchets bois et plastiques pour fabriquer des matériaux composites afin de mieux valoriser les produits connexes de la transformation du bois et contribuer conjointement à l'assainissement de l'environnement immédiat des populations urbaines, ceci de façon transposable à d'autres pays en développement.

Une des solutions les plus appropriées est de produire à l'aide de ces déchets des matériaux composites de type sandwich (peau en bois-polystyrène et âme en bois-plastique recyclé, les couches étant auto-collées) aux propriétés voisines de celles de certaines essences utilisées en menuiserie et en coffrage.

Objectifs

L'objectif général des recherches est de développer un matériau de type sandwich pour un usage dans le bâtiment en substitution au bois.

Les objectifs spécifiques sont de formuler les composites des couches du matériau sandwich, de définir le procédé de réalisation du matériau et d'en réaliser un prototype.

Matériel et méthode

La réalisation du sandwich se fait selon les étapes successives décrites dans le procédé de fabrication. Les intrants utilisés sont les suivants : sciure de bois de *Gmelina arborea*, déchets plastiques de type PEBD (polyéthylène basse densité), polystyrène expansé d'emballage recyclé (Fig.1), hydrocarbure (essence), cœur de branches de palmier *Raphia farinifera* disposées en nappes et servant à alléger l'âme du sandwich (Fig. 2).

Fig.1 : Polystyrène d'emballage

Fig.2 : Cœur de branche de Raphia

L'équipement utilisé pour fabriquer le matériau est principalement composé : d'un mélangeur et d'une presse mécanique associée à un moule pour le composite bois-polystyrène, d'un dispositif de préparation du composite bois-plastique (fonte du plastique et mélange avec la sciure de bois), d'un outillage de découpe des implants en raphia, d'un moule de fabrication du sandwich.

Résultats et discussion

Caractérisation de la sciure utilisée et étude du compactage du composite bois polystyrène

La courbe granulométrique de la sciure de bois utilisée (Fig. 3) montre que cette sciure est principalement constituée de particules fines de moins de 0,63 mm. La courbe de compactage du composite bois-polystyrène réalisé (Fig. 4) indique que le taux de compactage maximum est d'environ 56%, obtenu avec une pression d'environ 115 MPa. La densité moyenne à l'état sec du cœur de branche de raphia est 0,3.

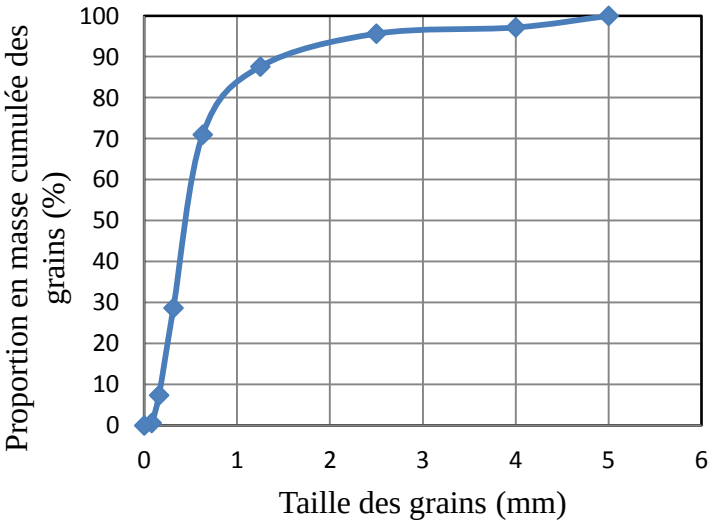


Fig. 3 : Courbe d'analyse granulométrique de la sciure brute de Gmelina collectée

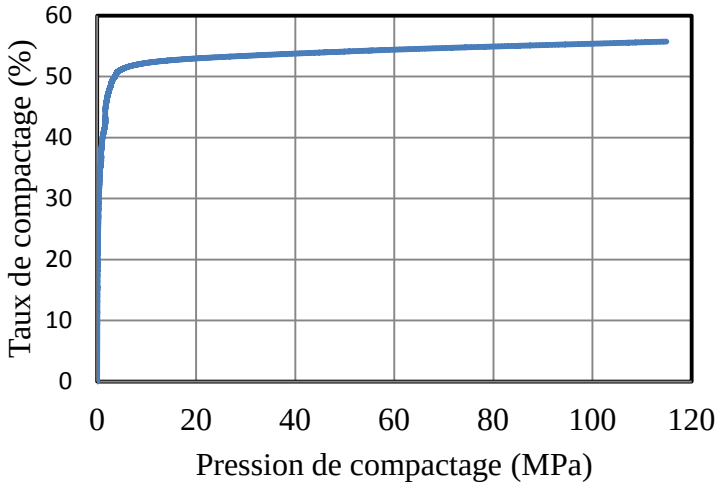


Fig. 4 : Courbe de compactage du composite bois-polystyrène (sciure de Gmelina, granulométrie 0,63mm)

Procédé de fabrication du sandwich et prototype obtenu

Le procédé de fabrication du sandwich comporte 4 étapes :

Etape 1 : Elaboration du composite bois polystyrène

* Dissolution du polystyrène dans l'essence dans la proportion massique optimale $m_{essence}$ / $m_{polystyrène}$ = 1,22 puis malaxage jusqu'à obtenir la colle ;
* Mélange de la colle avec la sciure dans la proportion massique optimale m_{colle} / m_{sciure}= 1,5 ;
* Selon le taux optimal préalablement déterminé, compactage du composite ainsi obtenu dans un moule à l'aide d'une presse mécanique jusqu'à stabilisation de l'épaisseur ;
* Démoulage des plaques en polystyrène et stabilisation jusqu'à solidification (5 jours environ).

Etape 2 : Préparation du composite bois plastique

* Fonte des sachets plastiques (PEBD) à une température voisine de 280 °C puis refroidissement de la colle obtenue jusqu'à une température inférieure à 170 °C tout en gardant la fluidité ;
* Mélange de la colle et de la sciure dans la proportion massique optimale (m_{colle} / m_{sciure} = 2,5) pour obtenir le composite bois plastique.

Etape 3 : Préparation de l'implant d'allègement

* Coupe et pré-séchage des branches de palmier raphia puis prélèvement du cœur des branches et étuvage jusqu'à une teneur en eau d'environ 10% ;
* Usinage des cœurs de branche à la scie circulaire : section 10x12 mm² et longueur égale à celle du sandwich ;
* Réalisation de la nappe d'implants en raphia comme structure d'allègement.

Etape 4 : Fabrication du sandwich autoadhésif

* Positionnement des deux plaques en bois-polystyrène préfabriquées dans le moule du sandwich, la distance les séparant correspondant à l'épaisseur de l'âme ;
* Coulage du composite bois-plastique dans le moule ;
* Renforcement de l'adhérence entre les couches en vibrant le composite ;
* Refroidissement du mélange dans le moule pendant environ 15 minutes puis démoulage.

Le prototype réalisé (Fig. 5) est constitué de peaux d'épaisseur 5 mm en composite bois-polystyrène et d'une âme d'épaisseur 20 mm en composite bois-plastique allégé par l'incorporation de cœur de branches de palmier raphia.

Fig. 5 : Prototype de sandwich réalisé

Conclusion et perspectives

La première phase de ce travail de recherche a consisté à concevoir puis mettre au point un matériau sandwich à partir de produits connexes de l'industrie du bois et de polymères (plastique PEBD et polystyrène) recyclés. Son procédé d'élaboration a été présenté.

Dans un second temps, des protocoles expérimentaux et numériques seront définis afin de caractériser le comportement du matériau sandwich et de le modéliser.

Références

Agbahungba G., Sokpon N. et Gaoué O.G. (2001) Situation des ressources génétiques forestières du Bénin. Document FGR/12F. Département des forêts, FAO, Rome, Italie, 36p.

Dessau S. (2012) Etude sur la gestion des déchets plastiques dans l'espace UEMOA : Cas du Bénin. Société d'Etudes Régionales d'Habitat et d'Aménagement Urbain cité par la Représentation Nationale du CREPA. Cotonou.

DGFRN (2016) Annuaire des statistiques forestières 2014-2015, réalisé avec l'appui de l'OIBT à travers le Projet PD 678/12Rev.1 (M) Mise en place d'un Système national d'information et de gestion des statistiques forestières, 66p.

Gildas E. (2014) Etude sur la gestion des déchets plastiques dans l'espace UEMOA - cas du Bénin, rapport final, Cotonou.

Poster D09

Valorization of pyrolysis by-products for the protection of biomaterials

BOER Febrina Dellarose[1,2,3], COMMANDRÉ Jean-Michel[1,2], THÉVENON Marie-France[1,2], FOURNIER Mériem[3,4]

[1]CIRAD, UR BIOWooEB, TA B-114/16, 73 Rue Jean-François Breton, F-34398 Montpellier CEDEX 5, France
[2] BIOWooEB, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
[3]AgroParisTech Centre de Nancy, 54000, Nancy, France
[4]LERFOB, AgroParisTech, INRA, 54000, Nancy, France
febrina.boer@cirad.fr

Keywords: biomass, bio-oil, entomology, mycology, pyrolysis, pyroligneous acid

Context and objective

From biomass pyrolysis process, non-condensable gases and condensed liquid are usually produced as by-products (Pimenta *et al.* 2018). The latter, also known as pyrolysis liquid or bio-oil, is an important compound due to its potential. It contains a lot of organic compounds such as acid, aldehydes, ketones, esters, furans, and phenols. Historically, bio-oil has also been utilized for many uses, such as soil conditioning, pesticide, and, interestingly, as herbicide, fungicide, and bactericide in plants (Tiilikkala *et al.* 2010, Pimenta *et al.* 2018). In short, bio-oil has been well-used to control microorganisms, especially those who attack and/or harm other biological matters.

Regarding biological matters, wood has been widely utilized around the world in various uses, ranging from arts, furniture, to civil engineering. At the same time, being a biomaterial, wood is susceptible to threats from biological agents such as fungi and insects. Wood preservative is thus important in the utilization of wood; moreover, with the recent trend of valorizing all parts of renewable resources including the by-products of industrial biomass process such as pyrolysis, it is of interest to utilize the bio-oil as wood preservation for protection against harmful organisms. Such an idea of using bio-oil as a wood preservative is not new; other studies have done it before (Temiz *et al.* 2013, Oramahi & Yoshimura 2013). However, few studies are focused on a biomass co-valorization processes coupling (i) the pyrolysis process to produce energy and gases, and (ii) the keeping and the valorization of condensable chemical compounds issued from this first thermochemical process into valuable chemical compounds, more particularly for their antifungal and antitermite activities.

A research focused on the "Energy valorization of lignocellulosic products and their by-products for the protection of bio-materials", started in March 2018, is dedicated to the valorization of the sugar cane bagasse. It has been reported that several varieties of fibrous sugar cane, which contain a high amount of fiber have been developed in Réunion Island, a region where the sugar industry plays an important role in the agricultural sector (Sabatier *et al.* 2015). Thus, this work will use several varieties of bagasse obtained from fiber cane instead of sugar cane alone. Therefore, the objectives of this research are to: (i) characterize the biochar and the bio-oil according to the pyrolysis process parameter and the biomass used, and to (ii) evaluate the potential of said bio-oil as wood preservatives.

Material and methods

The sugar cane bagasse provided by BioWooEB CIRAD were used as a reference, meanwhile, the other bagasse from different varieties will be tested in the future. Pyrolysis of bagasse was conducted using the experimental set up of fixed bed reactor (Fig 1). Various temperatures (T=400°C, 500°C) and holding time t_h (30 and 60 minutes), and a heating rate of 10°C/minutes were applied. Pyrolysis products, consisting of biochar and bio-oil, were recovered for further analysis. The biochar would be characterized for their proximate and ultimate analysis for energy valorization.

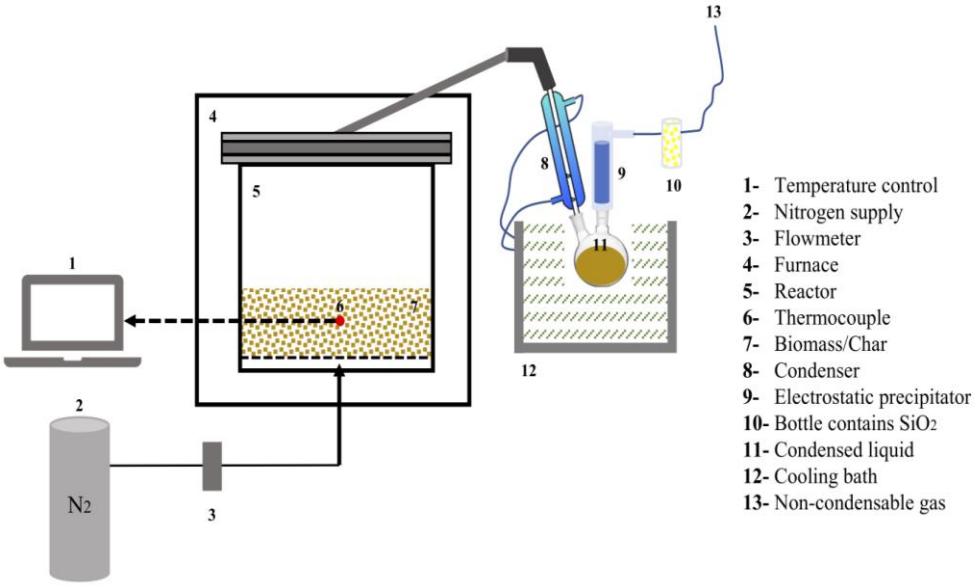


Fig. 1: Experimental set-up of the pyrolysis reactor

For evaluating the antifungal capability of the recovered bio-oil, we conducted fungal growth inhibition tests against two types of wood-decaying fungi: *Coriolus versicolor* (white-rot) and *Coniophora puteana* (brown-rot). Sterile culture medium was prepared from malt (40 g), agar (20 g), and bio-oil with 1% and 5% (v/v) of concentration for each treatment in distilled water (1 L) (according to Oramahi & Yoshimura 2013). The medium then placed in a 9 cm petri dish, and centrally inoculated with a fungus. The fungal growth will be monitored every day for 2 weeks. The treated sample will be compared to the control (petri-dishes contained only malt-agar medium) and inhibition rate will be determined.

Results

The evolution of temperature during the pyrolysis experiments have been followed and noted to correspond well with the planned/expected scheme (Fig. 2). Regarding the yield, it has been found that the highest bio-oil yield (55.38%) was obtained from the pyrolysis with the highest temperature (500°C) while the highest bio-char yield (33.38%) was obtained from the lowest temperature (400°C). Therefore, it could be seen that the trend between the two yields (bio-oil and biochar) are the opposite of each other. Further relationships between them and the other parameters (holding time, heating rate, etc.) will be studied. More pyrolysis experiments would also be conducted with other bagasse types.

The fungal tests are still ongoing at the time of writing. Future work will focus on characterizing bio-oil and continuing antifungal and antitermite tests. Finally, following the antifungal and antitermite evaluation, the formulation of preservative to impregnate the wood samples would be conducted. We would then conduct various tests on the fixation of the

preservative, durability, eco-toxicity, and the dimensional stability conferred to these new modified wood products.

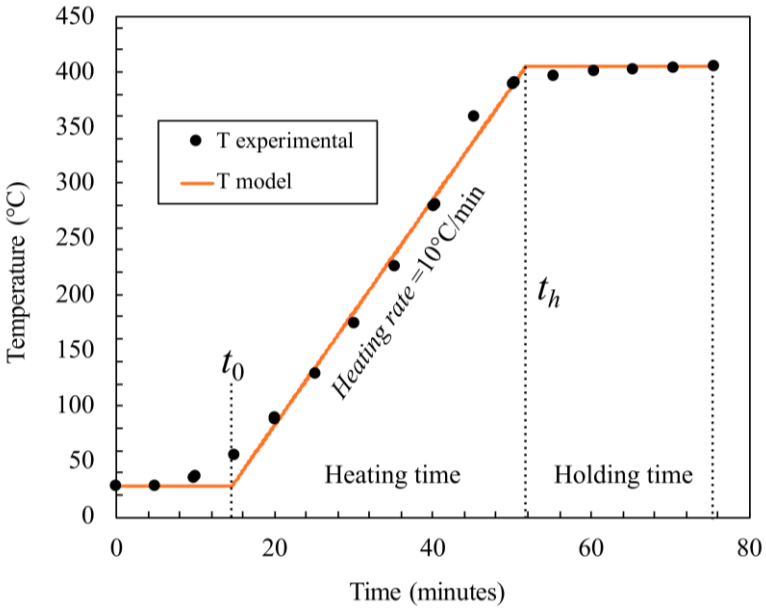


Fig. 2: Comparison between the expected pyrolysis process (*T* expected) and experiment (*T* experimental) with *t* as time passed in *x*-axis and *T* temperature in *y*-axis; $t_0 = t$ when effective heating started, $t_h = t$ when heating stopped, *T* holding reached, and holding started.

Acknowledgement

The authors acknowledge Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP) for the doctoral scholarship.

References

Oramahi H.A., Yoshimura T. (2013) Antifungal and antitermitic activities of wood vinegar from *Vitex pubescens* Vahl. *Journal of Wood Science* 59: 344–350.

Pimenta A.S., Fasciotti M., Monteiro T.V.C., Lima K.M.G. (2018) Chemical composition of pyroligneous acid obtained from eucalyptus GG100 clone. *Molecules* 23: 426.

Sabatier D., Martiné J., Chiroleu F., Roussel C., Letourmy P., Antwerpen R.V., Gabrielle B., Ney B. (2015) Optimization of sugarcane farming as a multipurpose crop for energy and food production. *GCB Bioenergy* 7: 40-56.

Temiz A., Akbas S., Panov D., Terziev N., Alma M.H., Parlak S., Kose G. (2013) Chemical composition and efficiency of bio-oil obtained from giant cane (*Arundo donax* L.) as a wood preservative. *Bioresources*. 8(2): 2084–2098.

Tiilikkala K, Fagernäs L, Tiilikkala J. (2010) History and use of wood pyrolysis liquids as biocide and plant protection product. *The Open Agriculture Journal* 4:111–118.

Poster D10

Impact of torrefaction processes on Brazilian biomasses storage

DE FREITAS HOMEN DE FARIA Bruno[1,2], ROUSSET Patrick[2,3], DE CASSIA OLIVEIRA CARNEIRO Angélica[1], CALDEIRA-PIRES[4] Armando, CANDELIER Kévin[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, Brazil
[2]CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France
[3]Joint Graduate School of Energy and Environment- Center of Excellence on Energy Technology and Environment-KMUTT, Bangkok 10140, Thailand
[4]Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brazil
kevin.candelier@cirad.fr

Keywords : Chemical composition; Coffee bark; Energetic properties; Eucalyptus; Fungal decay; Pine; Sugar cane; Torrefaction.

Context and objectives

Brazilian energy production differs from other countries since 44.0 % of the energetic matrix comes from renewable sources, 2.8 % higher than that obtained in 2016 (MMA, 2017). To avoid the use of non-renewable fuels limiting the environmental impact, the energy production from renewable sources would make it possible to use the residual biomass from the forest-based industry. However, biomass has some characteristics that hinder its direct use as fuel, such as high moisture content, low calorific value and low fixed carbon content, in addition to low density, especially when using residual biomass. In view of this, it is necessary to seek the most efficient use of this heterogeneous fuel in order to standardize and increase the biomass quality. In addition, the storage of these biomasses before, their energetic conversion, can cause several damages to the material properties.

Ligno-cellulosic biomasses, stored in humid environments for long periods, will absorb moisture and decompose, bringing about changes in physical properties, chemical composition and energy value. These changes reduce their potential to be processing and consequently decrease their market value. The higher moisture content (45-60%) of raw biomass has significant negative impact on the bioenergy production and its consumption chain and remains as one of the major obstacles for thermochemical conversion. A wet biomass, when stored could lose some solid mass due to the microbial decaying process.

This limitation can be reduced to some extent by pretreatment. Pretreatment alters the biomass chemicals and physical properties making it suitable for use in the existing energy conversion systems. Biomass pretreatment methods are classified into five categories: a) Chemical, b) Mechanical, c) thermal, (d) Hydrothermal (wet), and (e) Biological. The thermal pretreatment is a slow heating process in which biomass releases its volatiles. It is an emerging pretreatment method that has an ability to reduce the major limitations of biomass such as heterogeneity, lower bulk density, lower energy density, hygroscopic behavior, and fibrous nature. The utilization of torrefied biomass in existing handling and storage facilities and associated issues has been reported recently (Hermes, 2011; Zwart *et al.*, 2012; Kiel, 2014)

There is a great deal of interest in understanding the physical and chemical changes a during storage of different biomass forms used for energy applications. The main purpose of this PhD work is to study the links between physical (calorific powers, elemental composition), biological (durability) and mechanical (friability) properties of torrefied biomasses and their

storage conditions according to the conditions of torrefaction processes compared to the raw biomass properties. On another hand, a basic environmental study will be addressed to open lines of thought about possible futures studies.

Materials and Methods

Biomass samples

The experiment used four types of biomass residues, being of national and international relevance: eucalyptus residues, pine residues, sugarcane bagasse and coffee bark. These biomasses were first dried outdoors in a drying yard until they reached hygroscopic equilibrium moisture. Afterwards, milling was done in a hammer mill and classification in 2 mm aperture sieves, to suit the desired granulometry for the heat treatment and storage.

Torrefaction process

Approximately 3 kg of dried (at 103 °C) particles were used for each heat treatment. The eucalyptus, pine sugarcane bagasse and the coffee husk biomasses were transformed into particles in a knife mill and classified in screen sieves with 2 mm openings.

The biomasses were torrefied using three reactor times for each biomass, including Eucalyptus (10, 15, 20 minutes), Pine (10, 15, 20 minutes), sugarcane bagasse (5, 7, 10 minutes) and coffee bark (5, 10, 15 minutes). The temperature of the reactor was set at 290 °C for all treatment. An endless screw type reactor, developed in the Laboratory of Panels and Energy of Wood (LAPEM - UFV - Brazil) was used (Fig. 1).

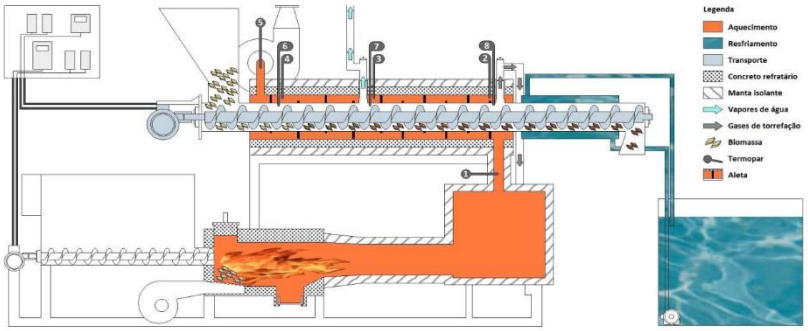


Fig. 1 : Layout in side view of the reactor for biomass torrefaction in semi-continuous flow (Magalhães, 2016).

Fungal decay exposure

All samples (native and heat treated) were firstly submitted to leaching process according to the NFX 41-569 (2014) standard (Fig. 2). Then, native and treated biomasses were place into plastic grid bags in order to expose themselves to wood destroying fungi. Before starting the fungus degradation experiment, the bags were oven dried 103 °C for 24 h and the dry mass (m_1) was determined for further determination of the mass loss in the experiment.

Decay resistance of native and torrefied biomasses was tested according to an adaptation of XP CEN/TS 15083-1 (2006) standard criteria, on both fungi species required by the standard: *Coriolus versicolor* (white rot) and *Coniophora puteana* (brown rot) (Fig. 3). The following fungal exposure duration were tested: 2, 4, 8, 12 and 16 weeks. After the decay exposure,

mycelia were removed and each sample was dried at 103 °C for 24 h and the final dried mass was determined (m_2). The Weight Loss was determined according to the formula: WL (%) = $(m_1 - m_2) / m_1$.

Fig. 2 : Leaching process according to NFX 41-569 (2014) standard criteria.

Fig. 3 : Samples in contact with fungal decay.

Sample characterization

The impact of leaching and fungal degradation, according to the duration of fungal exposure will be evaluated on the following native and treated biomass properties: the High Heating Values (according to the BS EN ISO 18125 standard); the elemental composition (according to the NF EN ISO 16948) and the chemical composition (NIRS analysis).

First Results

Torrefaction process intensity (depending on the duration) undergoes mass loss to the lignocellulosic material. Figure 4 shows that wood species and their respective chemical compositions are directly correlated to thermal degradation reaction kinetic. The torrefaction duration has also an impact on treatment intensity as well as on mass loss kinetic. Whatever the sort of biomass, the higher the intensity of treatment is, the higher the carbon content and the more energetic properties of the material are significant.

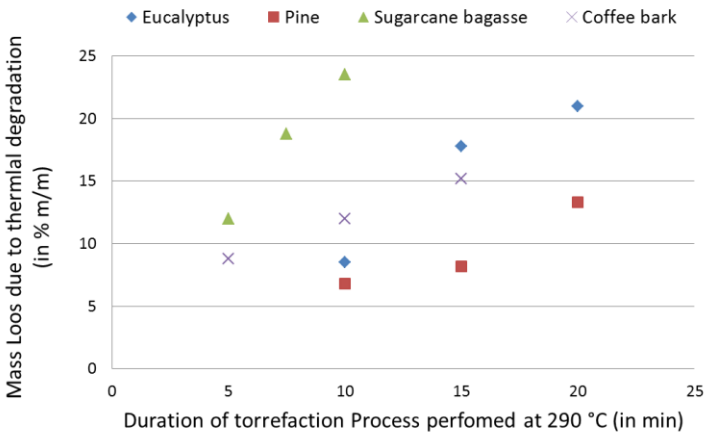


Fig. 4: Mass Loss due to the biomass thermal degradation according to the torrefaction duration.

The evolution of the raw and treated biomass energetically properties, after leaching and various fungal exposure durations are in course.

Conclusion and Perspectives

All results will be analyses in order to find indicators to predict torrefied sample degradation according to the torrefaction process and storage conditions in order to optimize the storage duration without lose torrefied biomass quality.

In parallel to the laboratory decay exposure test, field durability tests will be carried out on all samples, in France and Brazil. These outdoor exposed raw and treated biomasses will be regularly (every month, during one year) characterized in the same ways (HHV, Elemental and chemical compositions).

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the financial support granted to Bruno DE FREITAS HOMEN DE FARIA allowing him to carry out this PhD in collaboration with BioWooEB-CIRAD Institute.

References

BS EN ISO 18125 (2017) Solid biofuels. Determination of calorific value - Solid biofuels. Determination of calorific value. International Organization for Standardization.

Hermes H.D. (2011) Large-scale tests using refined wood pellets in coal power plants. Presented at 11th Industry Forum Pellets, Stuttgart, 5th October 2011.

Kiel J. (2014) Torrefaction - an enabler for biomass gasification. Presented at Biomass Gasification Europe 2014, Alkmaar, 2nd October 2014.

Magalhães, M.A. (2016) Tratamento térmico de partículas e *pellets* de madeira em reator tipo rosca sem fim. Master's thesis. [in portuguese]. Universidade Federal de Viçosa, Brazil.

Ministério de Meio Ambiente – MMA. 2017. Available at <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>.

NFX 41-569 (2014) Wood preservatives - laboratory method for obtaining samples for analysis to measure losses by leaching into water or synthetic sea water. French Association of Standardization.

NF EN ISO 16948 (2015) Solid Biofuels - Determination of Total Carbon, Hydrogen and Nitrogen Content. International Organization for Standardization.

XP CEN/TS 15083-1 (2006) Durability of wood and wood-based materials - Determination of the natural durability of solid wood to lignivorous fungi - Test methods - Part 1: basidiomycetes. European Committee for Standardization.

Zwart R., Quick W., Weaterstone S., Theobald K., Kollberg K., Hinderson A., Karlsson G., Padban N., Quak R., Khodayari R. (2012) Description of existing handling and storage facilities and the associated issues. Public report within EU FP7 Project: SECTOR – Production of solid sustainable energy carriers by means of torrefaction. Deliverable Report 6.1.

Poster D11

Influence du changement climatique sur les propriétés physiques et mécaniques du bois d'essences des zones semi-arides tchadiennes

DOUGABKA Dao[1, 2], GERARD Jean[1], GUIBAL Daniel[1], TIKRI Bianzeubé[2]

[1]UR BioWooEB, CIRAD
[2]Université polytechnique de Mongo (Tchad)
dougabkadao@yahoo.fr

Mots clefs : bois ; changement climatique; propriétés physiques ; propriétés mécaniques ; zone semi-aride ; Tchad.

Contexte et objectifs :

Le bois est un matériau hygroscopique anisotrope dont les propriétés dépendent du milieu environnemental et de ses conditions de croissance. Plusieurs études (Aussenac, 1978, Keller, 1993 ; Aussenac, 2000 ; Manise et Vincke, 2014) ont montré l'influence des précipitations et de la température sur la croissance de l'arbre. Au début du 20ème siècle, on a commencé à observer une augmentation de la température moyenne à la surface du globe (Cassou, 2004). Cette augmentation due à l'émission excessive des gaz à effet de serre dans l'atmosphère s'est accentuée durant les deux dernières décennies, obligeant de nombreuses espèces à s'adapter, ou les condamnant à disparaitre. En France, la canicule de 2003 avait eu des conséquences sur une grande variété d'essences (Lebourgeois, 2005), entre autres et de façon très visible les roussissements précoces des feuilles en milieu d'été et leur chute prématurée.

Dans un pays sahélien comme le Tchad (avec ses trois grandes zones climatiques : désertique, sahélienne et soudanienne) naturellement exposé aux aléas climatiques et faisant face au problème de désertification et de déforestation, les conséquences du changement climatique ne sont plus à démontrer. Les Hommes, les animaux et les végétaux subissent de plein fouet les effets de ce changement. Pour les plantes, on assiste à trois phénomènes visibles dus à ce changement : la mortalité accrue de certaines espèces, l'adaptation due peut-être à un changement de fonctionnement physiologique, voire génétique, et la migration. Face à ces adaptions et migrations, les bois verront logiquement leurs propriétés technologiques modifiées, impactant ainsi la qualité des objets fabriqués. Pour preuve, les usagers des bois de chauffe, charbon de bois et objets fabriqués avec les bois tchadiens se plaignent depuis plusieurs années de la diminution de leur pouvoir calorifique et de leur tenue mécanique. Il est à noter qu'avant l'interdiction d'exploitation des forêts au Tchad en 2008, les bois étaient utilisés dans une large gamme d'emplois : source d'énergie (bois de chauffe et charbon de bois), fabrication d'équipements et ustensiles de cuisine (mortier, pilon, banc, spatule, planche à couper…), pirogues, objets d'arts et instruments de musique (balafon, cithare…).

En conséquence, on est amené à se poser des questions sur les modifications des propriétés des bois dues à leur adaptation au changement climatique, surtout dans un pays comme le Tchad qui présente déjà des conditions climatiques extrêmes.

Ces travaux de recherche ont donc comme objectif de comprendre l'adaptation d'essences tchadiennes face à ce changement afin d'identifier les moins sensibles au stress et celles qui présentent les plus meilleures potentialités économiques pour une valorisation. Afin de pouvoir travailler de façon comparative, nous allons étudier des essences non spécifiques au Tchad et aussi disponibles dans d'autres pays de la région.

Matériel et méthode

Cette étude portera dans un premier temps sur deux essences de bois, *Faidherbia albida* (*Acacia albida*) et *Balanites aegyptiaca* (appelé Savonnier au Tchad) dont des échantillons ont été prélevés dans deux zones climatiques différentes du pays, la zone sahélienne (région de N'Djamena) et la zone soudanienne (région de Léré). Le choix de ses essences se justifie par leur répartition sur la grande majorité des zones climatiques tchadiennes, par l'importance qu'attache la population locale à ses espèces, et par leurs nombreux usages en bois d'œuvre au Tchad. Du fait de restrictions relatives aux coupes de bois au Tchad, nous avons volontairement limité la taille de l'échantillonnage. Pour chacune des deux essences et par zone climatique, nous avons prélevé dans un premier temps trois arbres, soit un total de six *Faidherbia albida* et six *Balanites aegyptiaca*.

Le prélèvement des échantillons s'est effectué en abattant chaque arbre à 50 cm au-dessus du sol (fig.1). Sur chaque tronc coupé, un billon d'environ 1 m de longueur a été prélevé. Ces billons ont ensuite été sciés en plateaux de longueur 60 cm (purge de 20 cm de part et d'autre du billon) et d'épaisseur 8 cm qui ont ensuite été séchés à l'air (fig.2). Des plateaux de 50 cm de longueur finale et de 6 cm d'épaisseur seront acheminés au CIRAD de Montpellier pour les essais.

Fig.1 : Prélèvement de troncs

Fig.2 : Plateaux en cours de séchage

Les essais à réaliser concerneront dans un premier temps les propriétés physiques et mécaniques de référence des essences choisies. Les caractéristiques à déterminer seront les suivantes : taux d'humidité, retraits de séchage, densité, infradensité, point de saturation des fibres, module d'élasticité, contrainte de rupture en flexion et en compression. Dans un second temps, nous procèderons à une étude dendrochronologique en faisant le lien entre les données climatiques et la largeur des cernes. Nous étudierons ensuite de façon comparative les propriétés physiques et mécaniques en fonction de la croissance des arbres.

Résultats à venir

Les premiers résultats à obtenir porteront sur les propriétés physiques des bois de *Faidherbia albida* issus de la zone climatique soudanienne tchadienne. Les propriétés dans un premier temps étudiées seront le taux d'humidité du bois, les retraits de séchage, la densité à 12% d'humidité et l'infradensité. Elles seront comparées aux résultats obtenus dans le cadre de la seule étude actuellement disponible portant sur les propriétés technologiques de cette essence (Giffart, 1971) ; pour cette étude, les échantillons étudiés étaient prélevés dans la zone soudanienne sénégalaise ; les résultats de cette étude ont montré que *Faidherbia albida*, bien qu'utilisé comme bois d'œuvre au Sénégal, présentait des propriétés technologiques d'un

intérêt limité, bien que des expériences complémentaires soient apparues nécessaires pour confirmer ce résultat.

Références

Aussenac G. (1978). La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers, Revue Forestière Française, vol.2, p.103-113.

Aussenac G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture, Annals of Forest Science, vol. 57, no 3, p. 287-301

Breda N., Granier A., Aussenac G. (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres, Revue Forestière Française, Vol. LII, p.73-90.

Breda N., Granier A., Aussenac G. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers, Revue Forestière Française, Vol. LVI, no 2, p.109-131.

Cassou C. (2004). Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique, La Météorologie, vol.45, p.21-32

Giffard P.L. (1971). Recherches complémentaires sur Acacia albida (Del), Bois et Forêt des Tropiques, vol.135, p. 3-20.

Keller R. (1993). Influence de quelques facteurs de la production sur la constitution du bois des arbres forestiers, Acta Botanica Gallica, vol. 140, no 4, p. 371-379.

Keller T., Edouard J.L., Guibal F., Guio J., Tessier L., Vila B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres, compte rendus de l'Académie des Sciences-Séries III-sciences de la vie, vol 323, no 10, p.913-924.

Lebourgeois F. (2005). Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (Fagus sylvatica L.) au climat en France et en Europe, Revue Forestière Française, vol. 1, P.33-50.

Manise T., Vincke C. (2014). Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie, Forêt Wallonne, n°129, p.48-57.

Poster D12

Activité antibactérienne de l'huile essentielle extraite de la sciure de bois de *Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus*.

OUAAR Djilali[1], MEGHERBI - BENALI Aicha[1], LOTTE Sylvain[2], GERARD Jean[2], TOUMI - BENALI Fawzia[1]

[1]L.R. Ecodéveloppement des espaces (Ecodev) - Université Djilali Liabes,Sidi Bel-Abbès, Algérie
[2] U.R. Biomasse, Bois, Energie, Bioproduits (BioWooEB) - Cirad, Montpellier, France
salimdjillali@yahoo.fr

Mots clefs : *Juniperus oxycedrus ;* activité antibactérienne ; sciure de bois ; huile essentielle.

Introduction

La diversité végétale sert à l'humanité en tant que ressource naturelle renouvelable pour une grande variété de produits chimiques biologiquement actifs. Ces composés constituent une source importante de molécules bioactives qui font généralement partie des métabolites secondaires. La recherche de nouvelles molécules actives à large spectre d'action est devenue une nécessité. Ces constituants actifs des plantes sont peu phytotoxiques et facilement biodégradables (Haddouchi et *al*., 2007).

Le choix s'est porté sur une plante médicinale, *Juniperus oxycedrus subsp.oxycedrus*, espèce pionnière et endémique de la région méditerranéenne, très dynamique, surtout en milieu forestier dégradé. Elle est présente dans les forêts de montagne de toute l'Algérie. Elle fournit, par distillation de son bois, l'huile de cade, noirâtre et goudronneuse, largement utilisée en médecine vétérinaire et en dermatologie pour traiter l'eczéma chronique et autres maladies de la peau ; cette propriété est directement liée à ses composés naturels, en particulier les composés terpéniques.

L'objectif de cette étude est l'évaluation de l'activité antibactérienne de l'huile essentielle extraite de la sciure de bois de *Juniperus oxycedrus subsp.oxycedrus* sur trois souches pathogènes *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Streptococcus faecalis*.

Matériels et méthodes

Matériel végétal

Le bois de *Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus* a été récolté dans la région de Dhaya à environ 65 km au sud de Sidi Bel-Abbès (Algérie occidentale), à une altitude de 1350 m. L'échantillon de bois (bois de cœur) a été transformé en sciures à l'aide d'une raboteuse.

Souches testées

Les souches bactériennes utilisées proviennent de l'Institut Pasteur d'Alger. Il s'agit de :

S1:*Escherichia coli* ATCC 25922.
S2:*Staphylococcus aureus* ATCC 25923.
S3: *Streptococcus faecalis* ATCC 29212.

Extraction de l'huile essentielle

L'huile essentielle (=H.E) a été obtenue par hydro-distillation. L'extraction a été réalisée au laboratoire de phytochimie de l'Université de Sidi Bel-Abbès. Une quantité de100g de

matière végétale a été introduite dans un ballon de 2L contenant 1L d'eau distillée. L'ensemble est porté à ébullition pendant 3 heures. Le distillat ainsi recueilli est introduit dans une ampoule à décanter afin de séparer l'eau de l'H.E qui surnage. La phase organique est séchée sur Na_2SO_4 et l'essence obtenue après évaporation du solvant est conservée dans un flacon clos à l'abri de la lumière et à basse température pour éviter toute dégradation.

Préparation de l'inoculum bactérien

A partir d'une culture de 18 h, une suspension bactérienne a été préparée de façon à obtenir une densité équivalente au standard de 0,5 Mac Farland. Cette densité correspond à une concentration de 10^6-10^8 UFC/ml (Wade *et al.*, 2001).

Evaluation de l'activité antibactérienne par méthode de diffusion sur gélose

La méthode des aromatogrammes est la technique choisie pour déterminer l'activité antibactérienne des H.Es à tester. Cette méthode repose sur le pouvoir migratoire sur un milieu solide à l'intérieur d'une boite de pétri ; elle permet de mettre en évidence l'effet antibactérien des H.Es et de déterminer la résistance ou la sensibilité de ces bactéries vis-à-vis de cette essence. Elle consiste à déposer des disques de papier Wattman (6 mm de diamètre) imprégnés de 10 µl d'H.E à différentes concentrations (200 µl/ml, 100 µl/ml, 50 µl/ml) à la surface d'une gélose Muller Hinton préalablement inoculée avec une suspension de la bactérie à étudier. La dilution de l'huile essentielle est effectuée dans le diméthyle sulfoxide (DMSO). Les boîtes sont maintenues à 4ºC pendant 1h pour que l'H.E puisse diffuser (Kumar et *al.*, 2009).

Les zones d'inhibition formées après une incubation de 24 h à 37 °C ont été mesurées. La sensibilité à l'H.E a été classée en fonction du diamètre des halos d'inhibition : non sensible pour les diamètres de moins de 8 mm, sensible pour les diamètres de 8 à 14 mm, très sensible pour les diamètres de 15 à 19 mm. La gentamicine est utilisée comme antibiotique de contrôle.

Analyses statistiques

Les données collectées sont traitées. La variable retenue pour l'analyse est la moyenne plus ou moins l'écart type ; l'analyse statistique est réalisée avec le logiciel IBM SPSS v 23. La comparaison entre les groupes est établie à l'aide d'une ANOVA ou du test Kruskal-Wallis, suivi, si les différences sont significatives, par le test de Tukey ou le test U de Mann-Whitney. Le seuil de signification est de 0,05.

Résultats

Extraction de l'huile essentielle

L'huile essentielle extraite se présente sous la forme d'une huile de couleur jaunâtre. Lors de cette expérimentation, 100g de sciure de bois a permis d'obtenir 0,2 g d'huile essentielle (rendement de l'extraction : 0,2%).

Activité antibactérienne

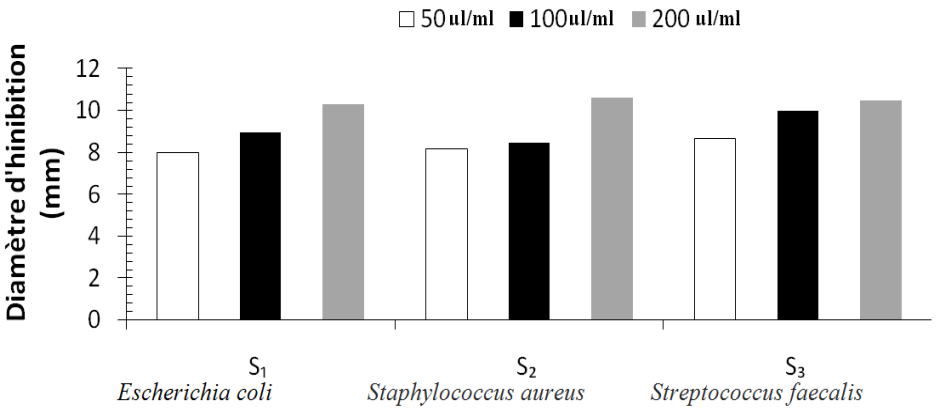


Fig. 1 : Variation du diamètre d'inhibition selon les souches et les concentrations de l'huile essentielle.

La mesure des zones d'inhibition(Fig1) montre que l'huile essentielle présente une activité antibactérienne significative. Selon les résultats de l'analyse de variance, l'effet inhibiteur de l'huile essentielle sur la croissance bactérienne est significativement différent d'une concentration à une autre. En effet, pour les trois souches testées, on remarque que la zone d'inhibition s'élargit lorsque la concentration en huile essentielle augmente. Le diamètre de la zone d'inhibition du témoin est nul ce qui confirme que le DMSO n'a aucun effet inhibiteur sur les souches ainsi testées.

Discussion

Il est difficile de comparer les résultats obtenus avec ceux de la bibliographie, le rendement obtenu n'étant que relatif et dépendant de la méthode et des conditions dans lesquelles l'extraction a été effectuée. Le rendement d'extraction des huiles essentielles varie non seulement en fonction de l'origine de la plante mais aussi de la partie de la plante traitée (Ciulei, 1982).

D'après les résultats des littératures, parmi les huiles essentielles du bois de *Juniperus oxycedrus subsp oxycedrus*, les sesquiterpènes constituent la fraction majeure à savoir le d-cadinene et le cis-thujopsene qui en sont les principaux composants (Monica et *al*., 2007). Les terpénoïdes confèrent aux huiles essentielles leurs propriétés antibactériennes. L'activité antibactérienne des huiles essentielles ainsi que leur mode d'action sont directement influencés par la nature et la proportion de leurs constituants. Les composés majoritaires sont souvent responsables de l'activité antibactérienne observée (Kalemba et Kunicka, 2003).

Conclusion et perspectives

Etant donné la toxicité et/ou les effets secondaires indésirables des molécules de synthèse ainsi que la résistance de certains germes microbiens aux composés actifs contenus dans les médicaments conventionnels, l'utilisation des plantes contenant des composés bioactifs est en progression constante. En effet, compte tenu de leur meilleure biocompatibilité, on observe une demande croissante en produits d'origine naturelle.

De façon générale, les huiles essentielles de sciure de bois de *Juniperus oxycedrus subsp oxycedrus* ont une activité antibactérienne marquée vis-à-vis des bactéries étudiées, activité qui varie d'une souche à une autre. Cette activité est due à la présence de terpénoïdes dont le degré de présence est fonction de la concentration des échantillons testés.

Les résultats obtenus sont encourageants et méritent d'être étudiés de façon plus approfondie afin de déterminer le seuil de l'activité. Aussi, nous pourrons tester et comparer l'action des huiles essentielles de différentes origines sur d'autres bactéries (Gram négatif, et Gram positive), et même sur certains champignons. Ceci est envisagé dans le but d'applications possibles dans le cadre de la technologie des barrières ou encore pour des applications antiseptiques dans des produits de détergence ou comme co-biocides dans des formulations de préservation du bois.

Références

Ciulei I. (1982) Practical Manuals on the Industrial Utilization of Chemical and Aromatic Plants. Methodology for analysis of vegetable drugs, Ministry of Chemical Industry, Bucharest, p.67.

Haddouchi F., Chaouche T.M., Ksouri R., et al. (2014) Phytochemical screening and in vitro antioxidant activities of aqueous-extracts of Helichrysum stoechas subsp. rupestre andPhagnalon saxatile subsp. saxatile. Chin J Nat Med 12(6): 415–22.

Kalemba D., Kunicka A. (2003) Antibacterial and antifungal properties of essential oils. Curr.Med. Chem. 10: 813-829.

Kumar M., Agarwala R., Deyb K.,et al.(2009) Antimicrobial Activity of Aqueous Extract of Terminalia chebulaRetz. on Gram positive and Gram negative Microorganisms. International Journal of Current Pharmaceutical Research Vol. 1 (1): 56- 60.

Monica R.,Rosa T.,FilomenaC.,et al.(2007) Comparative chemical composition, antioxidant and hypoglycaemic activities of Juniperus oxycedrus ssp.oxycedrus L. berry and wood oils from Lebanon. Journal de Chimie Alimentaire, 105,572-578.

Wade D., Silveira A., Rollins-Smith L., Bergman T., Silberring J., Lankinen H. (2001) Hematological and antifungal properties of temporin A and a cecropin A-temporin a hybrid. ActaBiochim Pol. Vol. 48, p1185 - 1189.

Poster D13

EXTRAFOREST : conception d'un outil d'aide à la décision pour rapprocher la chimie et les filières forêt-bois en régions Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté

Jean-Baptiste Pichancourt[1], Sylvain Caurla[3], Antoine Colin[2], Henri Cuny[2], Mathieu Fortin[1], Francis Colin[1]

[1]UMR SILVA (1434) Université de Lorraine – INRA – Agroparistech
[2]IGN ; [3]UMR BETA (7522) INRA
jean-baptiste.pichancourt@inra.fr ; francis.colin@inra.fr

Mots clefs : Extractibles Biochimiques ; Bio-économie ; R&D ; SIG ; Modèle démographique ; Modèle de filière ; Transfert de technologies

Contexte & Objectif

En sélectionnant le projet EXTRAFOR EST fin 2017, le ministère de l'agriculture a confirmé l'intérêt pour la société, la filière forêt-bois et l'industrie chimique, de valoriser les composés chimiques extractibles du bois et des écorces. C'est le cas par exemple des tanins qui se trouvent libres dans les écorces à des taux pouvant atteindre 20%. A la différence des polymères, les tanins et les extractibles de manière générale sont destinés majoritairement à des marchés de petits volumes mais à forte valeur ajoutée : cosmétique, santé humaine et animale, compléments alimentaires, détergence, etc …

Certains acteurs de la filière forêt-bois et des financeurs extérieurs à la filière pourraient investir dans cette nouvelle économie des extractibles. Cependant les investissements nécessaires à cette transformation peuvent être conséquents, et plusieurs informations sont requises avant de prendre des décisions. Le projet EXTRAFOREST, d'une durée de 3 ans, a pour objectif de fournir les connaissances et les outils numériques nécessaires pour estimer les quantités, l'hétérogénéité et la mobilisation des ressources en composés terpéniques et polyphénoliques, présents dans les principales essences des régions Grand-Est et Bourgogne-Franche-Comté (sapin, épicéa, douglas, chêne et hêtre), à la fois dans les bois directement issus de forêt et dans les connexes industriels. Nous présentons ici la méthode de modélisation et les toutes premières estimations des quantités et devenirs de ces composés chimiques le long de la filière.

Matériel et méthode

Site d'études, espèces et filière forêt bois considérées

Les taux d'extractibles tanniques et terpéniques, ainsi que les volumes et densités des principaux compartiments aériens de l'arbre (branches, nœuds, écorce, duramen et aubier) sont estimées pour six espèces présentes dans les régions Grand Est et Bourgogne Franche Comté : *Abies* (sapin), *Picea abies* (Epicéa), *Pseudotsuga menziesii* (Douglas), *Quercus robur & petraea* (Chêne pédonculé & sessile), *Fagus silvatica* (Hêtre). Deux thèses et un post-doc sont en cours pour estimer ces concentrations, volumes et densités.

Estimation des biomasses à l'échelle de l'arbre, de la région et le long de la filière (Fig. 1)

A partir des concentrations, volumes et densités, nous estimons les biomasses en extractibles à l'échelle de l'arbre sur pied. Les modèles statistiques développés par l'IGN permettent de projeter les biomasses estimées pour l'arbre à l'échelle de la ressource régionale, à partir des données d'inventaire de l'IFN. Nous projetons ensuite dans le temps les biomasses régionales en bois et extractibles entre 2018 et 2050 à l'aide du modèle démographique matriciel MARGOT ; celui-ci considère l'ensemble des individus catégorisés en classes de taille le long du cycle de vie des espèces. Les projections sont réalisées pour différents scénarios d'intensité de coupe des différentes essences, générés par l'ONF. Enfin nous modélisons et projetons les biomasses bois extractibles le long de la filière foret/bois pour la région Grand Est et Bourgogne Franche Comté à l'aide d'une version modifiée du logiciel CAT (*Chemical Accounting Tool ;* Pichancourt, Fortin et al., 2018), ainsi que des données filières de la DRAAF et de la littérature.

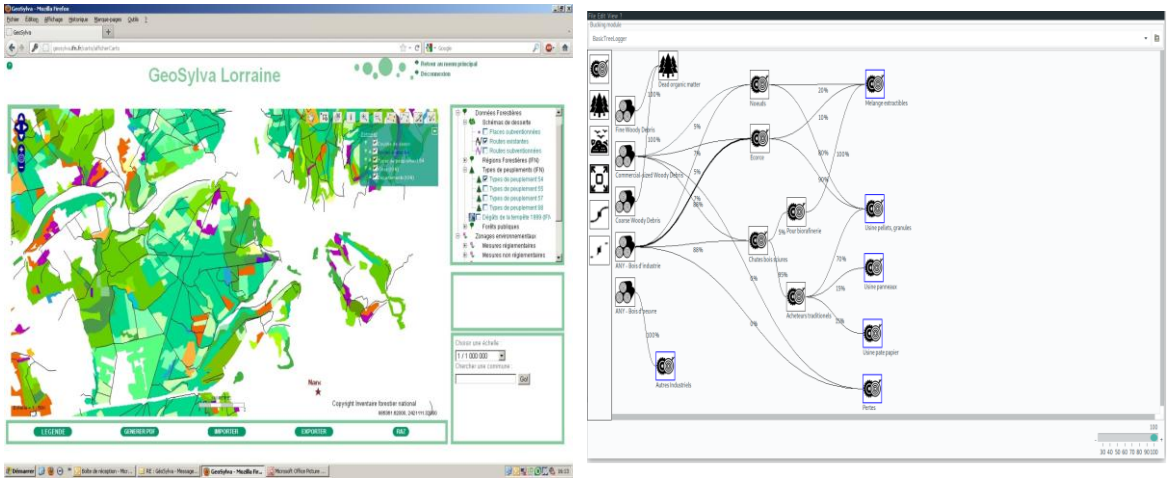


Fig. 1 : Intégration de l'outil geosylva (ONF, 2008), du modèle de dynamique de ressource forestière MARGOT (Wernsdörfer et al., 2012) et de l'outil filière de comptabilité d'éléments chimiques du bois CAT (*Chemical Account pour aider les futurs industriels ing Tool* : Pichancourt, Fortin et al. 2018).

Passer du jeu de modèles au Proof of concept (POC) d'outil d'aide à la décision online

Un travail d'articulation et de R&D est actuellement en cours en collaboration avec un industriel de la filière pour co-construire et tester un *Proof of concept* (*PoC)* du futur outil d'aide à la décision permettant de simplifier et systématiser sur une seule et même plateforme digitale les trois étapes suivantes :

1. Sélectionner sur un SIG online n'importe quelle zone infra-régionale (correspondant à une bassin d'approvisionnement) pour en caractériser la ressource présente en forêt et estimer dans le temps et l'espace les volumes de bois et quantités d'extractibles récoltables ;

2. Simuler et évaluer les flux et disponibilités de "matières" chimiques le long de la filière ;

3. Renseigner des indicateurs de nature économique permettant d'accompagner les changements nécessaires à l'émergence d'une filière extractibles.

Résultats

Lors de la conférence, nous présentons les premiers résultats des quantités d'extractibles à l'échelle de l'arbre, de la région et le long des filières bois. Nous présentons les estimations des biomasses en extractibles disponibles dans les connexes chez les scieurs et papetiers. Nous présentons les résultats permettant d'envisager des utilisations en cascade du bois, conformément à l'idée « pourquoi ne pas débarrasser les écorces des précieuses molécules qu'elles comportent, avant de les utiliser comme combustibles, mulch ou compost horticole ? ».

Conclusions & Perspectives

Les résultats que nous présentons correspondent à la première étape du projet. En 2019, nous débuterons la modélisation des comportements économiques de notre partenaire industriel concernant ses approvisionnements et sa production de produits transformés diverses. L'objectif sera de mieux comprendre et prédire les conditions qui lui permettront de mieux diversifier ses activités en intégrant la production d'extractibles, sans affecter ses activités traditionnelles de production, et tout en minimisant ses coûts. Pour cela, nous planifions d'intégrer le modèle comportemental dans l'outil décisionnel pour aider les futurs industriels à prendre de meilleurs décisions bio-économiques. Par la suite, cette collaboration aura pour objectif de définir les technologies numériques complémentaires qu'il sera important d'intégrer aux modèles existants pour mieux analyser et coordonner les flux de matière, d'achats, de transformations et de ventes en temps réels.

Une fois cette phase achevée, notre Proof of Concept (*PoC)* et projet EXTRAFOREST doivent servir de base pour la conception d'un outil planifié dans l'éventuel TIGA 'des Hommes et des Arbres'. Dans cette optique, nous aurons pour objectif d'étendre le transfert de technologie et connaissance pour aider les industries de la filière à prendre des décisions, non plus seulement stratégiques sur les investissement en extractibles, mais aussi opérationnelles concernant la production d'extractibles. A l'horizon 2021, le *PoC* de plate-forme digitale sera intégré à un *PoC* d'extracteur opérationnel qui nous permettra de démontrer par exemple comment des partenaires commerciaux peuvent mieux organiser la collecte et le tri des fractions de biomasse les plus riches ; comment spécifier les techniques de préparation (broyage) et d'extraction des molécules ; comment purifier les extraits ou voire même transformer (un peu) les molécules pour les rendre plus fonctionnelles; et enfin comment mieux cibler les marchés d'utilisation des tanins en termes de volumes et de prix.

Remerciements

Nous remercions les financeurs du projet EXTRAFOREST à savoir le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA), l'ADEME, le LABEX Arbre, le FEDER Lorraine et la Région Grand-Est ainsi que les pôles FibresEnergiVie et Industries Agro-Ressources qui ont labellisé le projet.

Références

Barreiro, Susana, Mart-Jan Schelhaas, Gerald Kändler, Clara Antón-Fernández, Antoine Colin, Jean-Daniel Bontemps, Iciar Alberdi et al. "Overview of methods and tools for evaluating future woody biomass availability in European countries." Annals of forest science 73, no. 4 (2016): 823-837.

Colin F. 2018. Les composés chimiques extractibles du bois : quel intérêt pour le forestier. Forêt Privées du Grand Est, 3, 10-11.

Kebbi-Benkeder, Z., Colin, F., Dumarçay, S. and Gérardin, P., 2015. Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. Annals of forest science, 72(2), pp.277-284.

Kebbi-Benkeder, Z., Manso, R., Gérardin, P., Dumarçay, S., Chopard, B., & Colin, F. (2017). Knot extractives: a model for analysing the eco-physiological factors that control the within and between-tree variability. Trees, 31(5), 1619-1633.

Lenglet J., Courtonne J-Y, et Caurla S. "Évaluation et représentation des flux de bois dans la filière." Ateliers REGEFOR 2015. Les innovations dans les usages du bois interpellent la gestion forestière (2016).

ONF - Lorraine, CRPF - Lorraine-Alsace. (2008) GEOSYLVA : forêts lorraines, atlas des mesures environnementales. ONF - Lorraine, CRPF – Lorraine-Alsace. 53 p.

Pichancourt, J. B., Manso, R., Ningre, F., & Fortin, M. (2018). A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles. Environmental Modelling & Software, 107, 158-174.

Wernsdörfer H., Colin A., Bontemps J-D, Chevalier H., Pignard G., Caurla S., Leban J-M, Hervé J-C, & Fournier M. (2012). "Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure. Annals of Forest Science 69: 829-844.

Poster D14

Radial variation of wood properties on hardwood recovered from thinning

PURBA Citra Yanto Ciki [1, 2], RUELLE Julien [2], FOURNIER Meriem[1]

[1]Citra Yanto Ciki Purba, AgroParisTech, France,
[2]Université de Lorraine, AgroParisTech, Inra, Silva, F-54000 Nancy, France
citra-yanto-ciki.purba@inra.fr

Mots clefs : Mechanical properties; MFA; Radial variation; Ring width; Shrinkage; X-ray

Introduction

During the development of tree stands, the number of trees per hectare is often reduced, thus allowing trees with a higher potential to grow faster thanks to the increase of space and better access to nutrients, water, and sunlight. This operation, called as thinning, involves felling many young and small diameter trees that may contain a high proportion of juvenile and tension wood. Juvenile wood is the wood located in the region close to the pith created at the beginning of the radial growth that can be characterized by a large gradient of wood properties and relatively lower mechanical properties compared to mature wood (Zobel and Sprague 2012). Juvenile wood has been less described in hardwoods and semi-natural forests of long cycles (120-220 years) as oak or beech. Fukazawa (1984) defined the juvenile wood in hardwoods as the region up to 5-8 cm from pith to bark regardless of their growth rates where lower or upper height levels of the tree would change the extent of juvenile wood somewhat. Nevertheless, the separation point between juvenile and mature wood is dependent on the species, the method used, and the characteristic under consideration (Zobel and Sprague 2012). There are several mechanistic hypotheses on the location of the juvenile wood which generally based on the position of the live crown, cambial age or stem diameter (Meinzer et al. 2011). Due to climatic risk mitigation and to the market demand in industrial wood products and fuelwood, there has been a move toward harvesting trees much younger than in the past, and also in increasingly using small trees that are removed during thinning operations. Moreover, hardwoods are abundant and adapted to climate and soils in central Europe, but structural uses of timber are mainly limited to softwoods due to the lack of tested practices and information about wood quality. Improving the added-value of these abundant resources is essential. To achieve a better valorization of small and suppressed broadleaved trees, a better understanding of the variation of their wood properties is important.

This study aimed to understand the radial variation of wood structure and properties in young beech and oak trees issued from thinning. As the final utilization of this wood is for the structural purpose, the effect of different wood radial position on the wood mechanical and physical properties has been investigated. Wood density, modulus of elasticity (MOE), and shrinkage of several radial positions were compared. The microfibril angle (MFA), earlywood and latewood density, and ring width were also measured from pith to bark as they are candidate variables to be used as proxies of mechanical and physical properties through growth models calibrated from X-ray microdensitometry and tree ring analysis.

Materials and methods

Round wood of beech and oak were gathered during thinning of tree stands in a local forest in Lorraine, France. This round wood material comprised of 20 bolts of 150 cm long with diameters between 21 and 30 cm. Oak ages ranged between 61 and 90 years old while beech ages ranged between 57 and 84 years. Each bolt belonged to the upper part of the trunk and

generally contained knots. A disk of 3 cm thick was extracted from the central part of each round wood. Next, a flitch of 1.5 cm wide was prepared from bark to bark through the pith. Afterward, a 2 mm thick strip was cut from each flitch and scanned using x-ray method in order to measure the radial growth component thanks to microdensitometric analysis (Mothe et al. 1998). The remaining part of the flitch was then cut into sections of 1 cm long from pith to bark and numbered consecutively. The MFA was measured on each section by using an X-ray diffractometer (XRD). We then divided the sample into two categories based on the radial position inside the trunk. The first category called internal originated from the area nearest to the pith while the second category from the nearest area to the bark. Each bolt was cut into eight wood specimens with a dimension of 380 mm x 20 mm x 20 mm. These wood specimens were extracted from 8 different positions where four specimens were in internal position and the remaining in external position. The wood samples were dried into 12% of moisture content (MC). The dynamic MOE was measured using a nondestructive test (Bing ®) which based on vibration method (Brancheriau et al. 2007). After evaluating longitudinal (Ls), radial (Rs) and tangential (Ts) shrinkage, the volumetric shrinkage (Vs) was calculated by using the data of the Rs and Ts. The fiber saturation point (FSP) was evaluated using the intersection point of surface shrinkage computed also using Rs and Ts only.

Results & Discussion

Juvenile wood is noticeable for oak and beech (Figure 1). In Oak, it is characterized by bigger ring, higher density, and higher MFA. Both earlywood and latewood width are larger in juvenile first rings compared to mature zone. Moreover, the earlywood in juvenile wood rings shows a higher density compared to the mature wood. Higher earlywood density of juvenile wood indicated that it has a lower porosity which is corresponded to the literature that reported a higher amount of vessel in mature wood rings (Helińska-Raczkowska 1994). The mature wood of oak is considered to start after around 15-20 ring.

For beech, the juvenile wood has larger latewood and higher MFA than mature wood. The ring density was decreasing from the pith to the bark. This decreasing is due to the decrease in earlywood density. The demarcation point of the mature wood on beech seems to be around 20-25 years. Study on the dominant trees of beech by Bouriaud et al. (2004) shows that the ring density tends to decrease from pith to the bark. On the other hand, the ring width is decreasing from the pith to the cambial age of fewer than 20 years and rise larger up to 4.5 mm after this point which is three times larger than ring width found in this study. The turning point reported on that study fits well to the demarcation point found for beech in our paper. However, after the demarcation point, the ring width is somewhat stabilized unlike what has been observed in dominant trees. The difference in the radial variation of ring with the one reported by (Bouriaud et al. 2004) is due to the different tree status. Roundwood removed from thinning were suppressed trees that growth under hard condition thus developed smaller annual ring compared to dominant and remained somewhat stable along tree’s life.

The comparison between internal and external position in Table 1 shows that the wood density, FSP, the Vs, Rs and Ts in both species are higher in internal than external. However, the difference was not significant statistically at 0.05 level for Ts on oak. Longitudinal shrinkage was relatively the same for both positions. The FSP and Vs are higher in the internal position probably due to the effect of higher specific gravity. The increase of Vs with higher wood density has been reported on previous studies on oak and beech (Deret-Varcin 1983; Gryc et al. 2008). Nevertheless, further analysis is needed to explain the variation of the FSP.

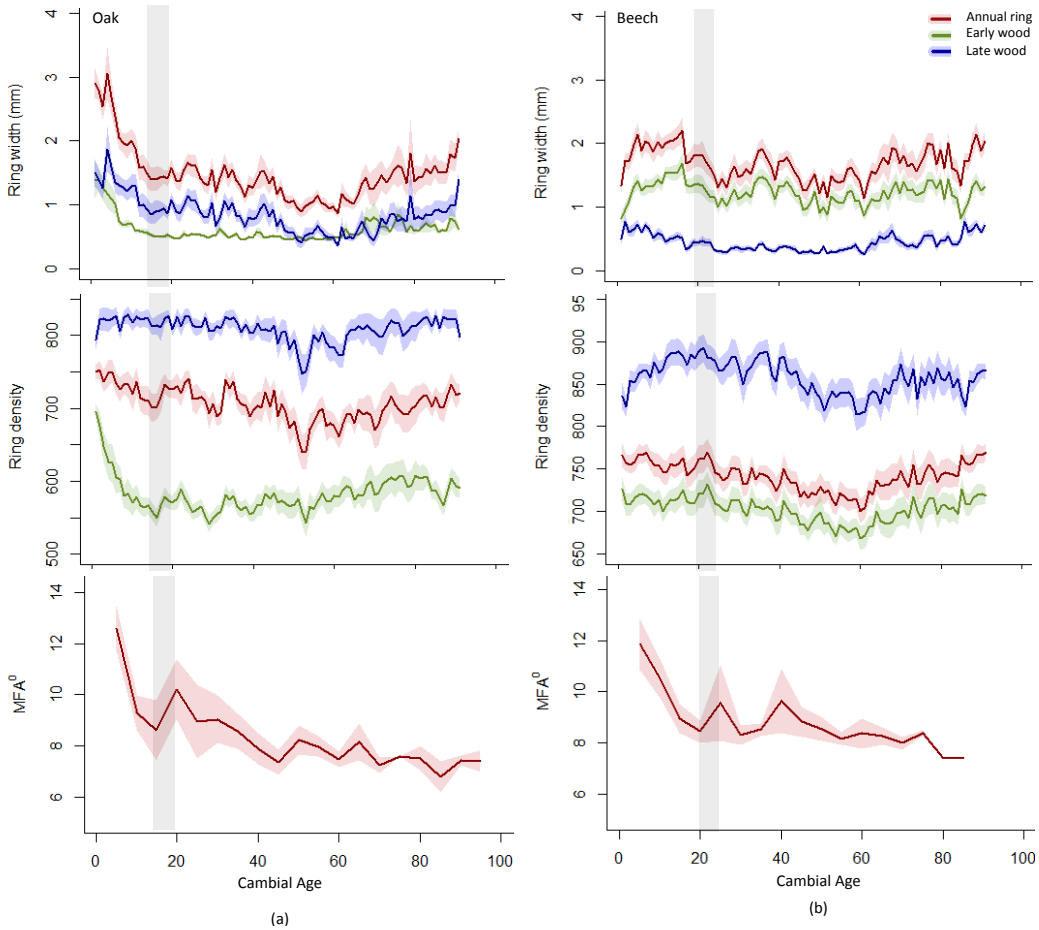


Fig. 1. Radial variation of ring width, ring density and MFA from the pith to the periphery of a) Oak and b) Beech. The solid line and the light color area around each solid line represent the mean value and the standard error measured on each ring from all measured tree.

Tab. 1. Comparison between internal and external wood in terms of mean values of structural, mechanical, and physical properties. D, mean wood density; FSP, fiber saturation point; Ls, Rs, Ts, Vs, longitudinal, radial, tangential, and volumetric shrinkage from green to the oven-dry condition. Different letters above the numbers signify statistically different populations, based on posthoc Tukey's HSD tests ($p < 0.05$). Values in parenthesis are standard deviations.

Species	Position	D (kg/cm^3)	MOE (GPa)	FSP (%)	Ls (%)	Rs (%)	Ts (%)	Vs (%)
Oak	Internal	734.4^b (25.1)	15.9^a (1.7)	33.5^b (1.9)	0.4^a (0.1)	6.8^b (0.6)	10.8^a (1.2)	16.8^b (1.1)
	External	705.1^a (38.1)	15.6^a (1.6)	30.6^a (2.0)	0.5^a (0.1)	5.7^a (0.4)	10.2^a (1.0)	15.3^a (1.2)
Beech	Internal	746.8^a (42.8)	15.3^a (2.2)	35.6^b (0.2)	0.4^a (0.1)	6.6^b (0.6)	12.8^b (0.7)	18.5^b (0.9)
	External	722.4^a (46.0)	16.4^b (1.8)	33.5^a (2.2)	0.5^a (0.3)	5.7^a (0.4)	12.2^a (0.8)	17.2^a (1.0)

Higher wood density did not result in higher MOE in the internal position. In the area closer to the pith, wood density is higher, but the MFA is also bigger. The tradeoff between wood density and MFA may be the reason behind this trend. High MFA may cancel the effect of

high density in the internal position. The oak MOE is not affected by the wood position. In contrast, beech MOE is significantly higher on external position. Higher MOE on external for beech may be due to the lower MFA variation between the two-positions on beech compared to the MFA variation on oak.

Results showing slightly higher wood density and swelling on juvenile wood but relatively comparable MOE with mature wood comply with the previous report by Gryc et al. (2008) on beech. That paper reported that the difference of density and other properties between juvenile and mature wood are not huge. The density on juvenile wood was slightly higher than mature wood which can be explained by a higher number of rays than mature wood. Rays generally has higher density than wood itself.

Conclusions

Juvenile wood shows higher MFA for both species and larger rings for oak and larger latewood width for beech. The area of juvenile wood on both species were below 5 cm from the pith which is putatively due to the fact that these were suppressed trees that growth under hard condition thus developed small annual ring. As for the perspective of further processing of these trees such as veneering, there will be no or low part juvenile wood peeled as it is concentrated on the small region near the pith. Juvenile wood has slightly higher wood density and swelling but relatively comparable MOE with mature wood. For both species, the wood density was better correlated with MOE dynamic for the external position which can be explained by the higher variation of MFA in the internal position.

Acknowledgement

The authors are grateful for the financial support of Indonesia Endowment Fund for education.

References

Bouriaud O., Bréda N., Moguédec G.L., Nepveu G. (2004) Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. Trees 18:264–276.

Brancheriau L., Paradis S., Baillères H. (2007) Bing - Beam Identification by Non-destructive Grading (Cirad). http://ur-biowooeb.cirad.fr/en/products/bing/what-is-it. Accessed 6 September 2018.

Deret-Varcin E. (1983) Etude comparative de la qualité du bois de trois types de chênes (rouvres, pédonculés et intermédiaires), en forêt de Morimond. Ann. Sci. Forest. 40:373–398.

Fukazawa K. (1984) Juvenile Wood of Hardwoods Judged by Density Variation. IAWA J. 5:65–73.

Gryc V., Vavrcik H., Rybnicek M., Premyslovska E. (2008) The relation between the microscopic structure and the wood density of European beech (Fagus sylvatica L.) J. Forest Sci. 54:170-175.

Helińska-Raczkowska L. (1994) Variation of vessel lumen diameter in radial direction as an indication of the juvenile wood growth in oak (Quercus petraea Liebl). Ann. Sci. Forest. 51:283–290

Zobel B.J., Sprague J.R. (2012) Juvenile wood in forest trees. Springer Science & Business Media

Poster D15

Conception et évaluation de systèmes d'innovation pour mieux mobiliser les bois en petite propriété forestière privée

ARNOULD Maxence[1,2], MOREL Laure[1], FOURNIER Meriem[2]

[1]ERPI, Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs, Université de Lorraine, Nancy
[2]UMR Silva, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, Nancy
maxence.arnould@agroparistech.fr

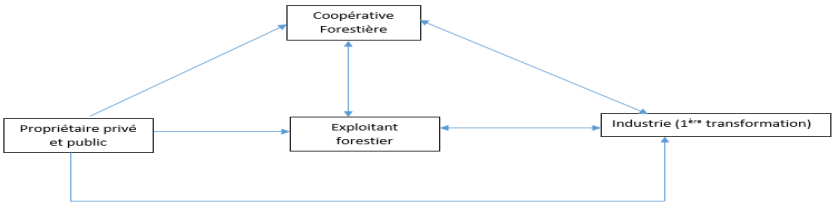
Mots clefs : système d'innovation ; mobilisation des bois ; living lab ; propriété forestière privée ; massif forestier

Contexte

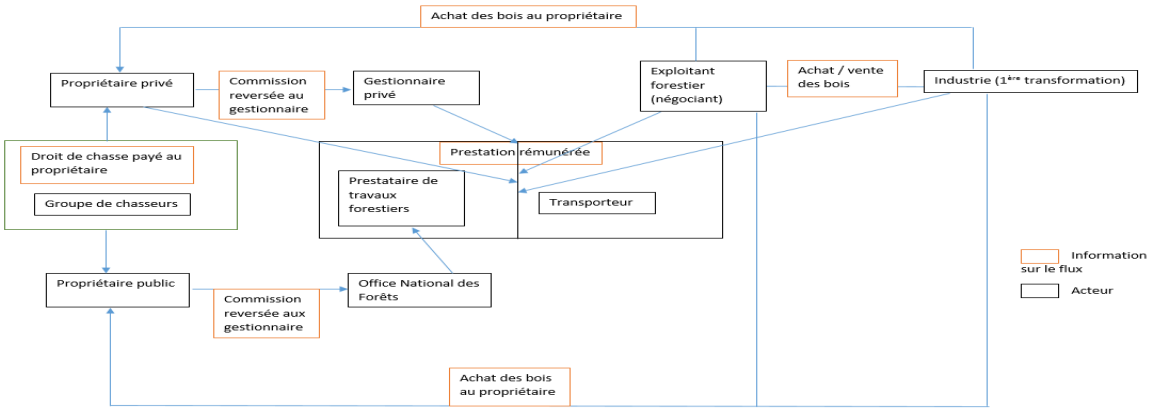
En France, 31% de la surface est occupée par des forêts soit environ 16,9 millions d'hectares (IGN, 2017), avec une répartition de 74% de forêts privées et 26% de forêts publiques (CNPF, 2015). On recense une surcapitalisation de la forêt française avec un accroissement annuel biologique en 2017 de 92 millions de m3 (IGN, 2017) alors que la récolte de bois s'élève à 60.1 millions de m3 (récolte commercialisée et autoconsommée), (IGN, 2017). Mieux récolter et valoriser cette surcapitalisation se heurte à la difficulté de mobiliser les bois dans les petites et moyennes propriétés privées, difficulté expliquée par deux raisons principales : le morcellement de la propriété (3,5 millions de propriétaires forestiers en France, dont 2 millions possédant moins d'un hectare, CNPF, 2015) et l'absence de document de gestion durable obligatoire en dessous d'une surface de 25ha. Les forêts sans plan simple de gestion (PSG) représentent 77% de la surface des forêts privées en France soit environ 9 millions d'hectares (IGN, 2018). Notre objectif pour ce projet de thèse financé par l'ADEME (2018-2021) est de développer des méthodes pour concevoir et évaluer des systèmes d'innovation multi acteurs visant à augmenter la mobilisation de bois en petite forêt privée à l'échelle du massif forestier. Ces méthodes sont celles du génie des systèmes industriels rarement utilisées pour l'étude des systèmes de mobilisation des bois (c'est-à-dire l'amont de la filière bois) sinon au travers de modèles d'évaluation de flux de type « sustainability impact assessment » (voir par exemple Lindner et al. 2010).

Matériels et Méthodes

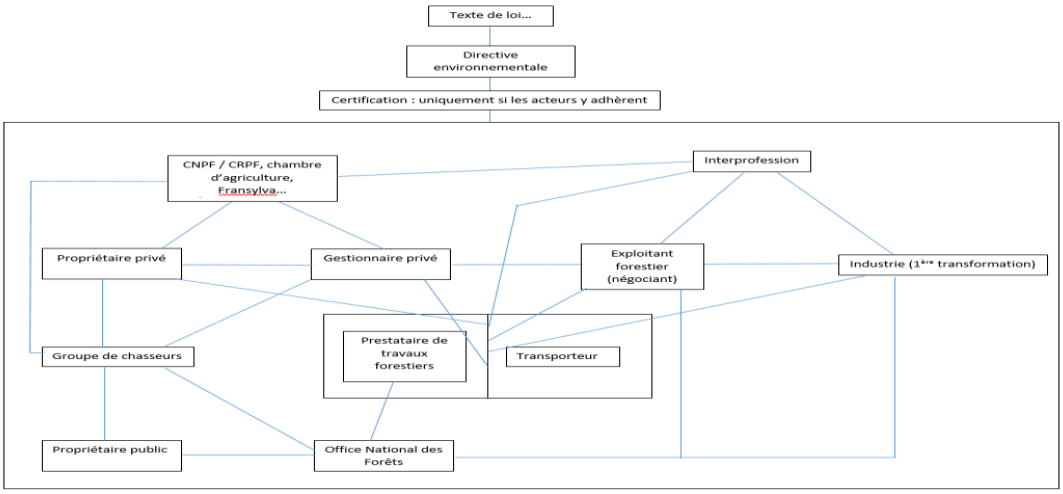
Les étapes méthodologiques de ce projet de thèse relèvent de la recherche-action afin de faire cohabiter le monde de la théorie et celui de la pratique. Une entente de qualité entre ces deux mondes est une source de réussite pour mener à bien ce projet. La thèse se met en place dans le contexte du développement d'un « Forest Innlab » associé au « Lorraine Fab Living Lab » labellisé depuis 10 ans. Les livings labs sont un nouveau type de structures stimulatrice d'innovation développées sous l'impact des communautés de la santé et du numérique (Bergvall-Kareborn et al., 2009). Pour la filière forêt-bois c'est l'opportunité d'ouvrir les frontières de ses entreprises et de sa recherche sectorisée, pour créer de nouveaux partenariats public-privé (Dupont et al, 2015) dans lesquels chercheurs et entreprises se coordonnent pour mettre à profit le travail de recherche au centre des utilisateurs (Bergvall-Kareborn et al, 2009).



a)



b)



c)

Fig. 1 : Schéma général des flux existants entre acteurs sur un massif. a) les flux physiques, b) les flux financiers, c) les flux informationnels

Identifier les acteurs au sein d'un massif forestier

La première étape de la thèse est d'identifier le rôle de chaque acteur au sein d'un massif forestier pour comprendre les interactions existantes entre ces parties prenantes. Les différents flux physiques, financiers et informationnels (Fig. 1), les influences entre acteurs et les finalités lorsqu'il s'agit de mieux mobiliser les bois sont une source d'information essentielle pour comprendre le fonctionnement de cette filière forêt-bois amont (du propriétaire jusqu'à la première transformation).

La méthode des « personas » pour faciliter l'accès à la ressource

Une des phases importantes du projet sera la réalisation des profils de propriétaires forestiers avec la méthode des personas. L'objectif est de pouvoir formaliser des leviers d'action

adaptés en fonction des différents types de propriétaires. La méthodologie de création de personas s'effectue en cinq étapes (Molitor, 2013) : (1) Récolte des données (2) Définir les critères clés des profils (3) Formation du portrait-robot (4) Finalisation des portraits robots (5) Diffusion des personas. Les personas s'inspireront de travaux scientifiques antérieurs ayant mis en évidence des typologies de propriétaires privés (De Galbert, 2009 ; Boon et al., 2004) et des résultats du RESeau d'Observation économique de la FOrêt Privée (RESOFOP, 2017). Le RESOFOP, porté par le Centre National de la Propriété Forestière et la Fédération Nationale des Forestiers Privés de France, réalise depuis 2009 des enquêtes téléphoniques sur le comportement des propriétaires forestiers privés. Ces enquêtes portent sur un nombre important de propriétaires (plus de 2500). La méthode des personas doit permettre de confronter ces résultats d'enquêtes aux perceptions locales des acteurs puis de les traduire en portraits robots opérationnels pour les animateurs de projets et les acteurs de la filière en situation de devoir interagir avec les propriétaires.

Un massif vosgien démonstrateur en vue de réplicas

Cette méthodologie sera testée sur le massif Vosgien découpé en sous-massifs (au moins plaine et montagne) choisi pour ces caractéristiques de fort morcellement de la propriété privée ainsi que sa diversité forte d'essence forestière. Des réplicas seront ensuite envisagés sur le reste du territoire national. Le Massif Central avec son taux de forêts privées élevées, sa surface moyenne très basse et sa ressource disponible très importante avec une majorité de peuplements matures, semble prioritaire pour cette phase ultérieure.

Résultats attendus à l'issue du projet

Donner un sens collectif à l'augmentation de la mobilisation du bois

La politique publique d'augmenter la récolte et l'utilisation du bois participe activement au développement de la bioéconomie pour substituer des produits bois « biosourcés », issus de carbone renouvelable, « naturels », peu énergivores, issus de filières sèches (ce qui n'est pas le cas des produits béton ou ciment pour la construction). Ces matériaux et énergie bois contribuent à l'atténuation du changement climatique. L'enjeu de mobiliser plus de bois vise aussi à reterritorialiser la filière forêt bois en limitant les importations de bois creusant actuellement une partie du déficit commercial de la filière, en créant de l'emploi en milieu rural. Elle doit également contribuer à financer le renouvellement des forêts et leur adaptation aux risques accrus par le changement climatique ou leur meilleure contribution au bouquet général des services écosystémiques fournis par les forêts. L'ensemble de notre projet vise à créer une action collective qui fédère les acteurs d'un massif et construise un réseau efficace porteur de sens.

Le renforcement d'un réseau et d'un esprit de filière

Que le sens de l'action collective vienne de l'engagement dans la bioéconomie, le développement territorial local, l'adhésion à des filières professionnelles, l'investissement dans des projets environnementaux, de prévention des risques …ou d'autres leviers à identifier, ce projet est fondé sur l'hypothèse que l'on peut et doit créer des liens entre acteurs de la filière à l'échelle d'un massif ou d'un sous-massif. La filière souffre des comportements individualistes et de la faiblesse des réseaux des acteurs, et cela nuit au bon usage du bois en faisant porter l'objectif d'augmentation de la récolte sur les forêts gérées au détriment des petites propriétés qui capitalisent. La cohésion recherchée devra se faire entre acteurs issus de différents secteurs d'activités créant un cheminement amont / aval complet porté par un objectif commun. Les principes de concurrence devront bien entendu subsister entre acteurs

du même secteur d'activité, permettant par exemple de multiples possibilités de gestion pour les propriétaires.

Discussion

Substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables, réduction des importations de bois, création d'emploi dans la filière, financement du renouvellement des forêts ou d'autres projets environnementaux… nombreux sont les enjeux économiques auxquels peut répondre ce projet de thèse. Il faudra considérer les conflits entre la récolte de bois et d'autres usages des espaces forestiers - préservation de la biodiversité, valeur paysagère, infrastructures touristiques… - et savoir même les transformer en interactions positives. Mieux mobiliser les bois en petite forêt privée doit s'accorder avec la multifonctionnalité en forêt afin d'en satisfaire l'ensemble de ces utilisateurs, en sachant créer un système d'innovation capable de gérer les compromis et la diversité des attentes sur les forêts.

Références

Bergvall-Kareborn, B., Holst, M., Staahlbrost, A., (2009), Concept design with a Living Lab approach, In Proceedings of the 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, 1-10. Hawaii.

Boon, T.E., Meilby, H., Thorsen, B.J., (2004), An empirically based typology of private forest owners in Denmark–improving the communication between authorities and owners.Scand. J. For. Res. 19 (suppl.4), 45–55.

Centre National de la Propriété Forestière, Forestiers privés de France, (2015), Les chiffres clés de la forêt privée.

Centre National de la Propriété Forestière, Fédération des forestiers de France, (2017), RESOFOP 2009-2016: une synthèse des résultats, RESeau d'Observation économique de la FOrêt Privée, Février 2017

De Galbert, M., (2009), La forêt privée, un potentiel méconnu, RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT N°59

Dupont, L., Morel, L., Guidat, C., (2015), Innovative Public-Private Partnership to Support Smart City: the Case of "Chaire REVES". Journal of Strategy and Managment, Vol. 8 Iss. 3, pp.245-265.

IGN, (2017), Mémento 2017, Institut National de l'Information Géographique et Forestière.

IGN, (2018), la feuille IGN février 2018, Portrait des forêts privées avec ou sans plan simple de gestion

Lindner, M., Suominen, T., Palosuo, T., Garcia-Gonzalo, J., Verweij, P., Zudin, S., &Päivinen, R. (2010). ToSIA—A tool for sustainability impact assessment of forest-wood-chains. EcologicalModelling, 221(18), 2197-2205.

Molitor, P., (2013), « Bien cibler votre clientèle : 5 étapes pour créer un persona », Génération INC par TELUS Bergvall-Kareborn, B., Holst, M., Staahlbrost, A., 2009, Concept design with a Living Labapproach, In Proceedings of the 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, 1-10. Hawaii.

Poster D16

Surface characterisation of untreated wood surfaces after artificial and natural weathering

BUCHNER Julia[1], IRLE Mark[1], BELLONCLE Christophe[1], MICHAUD Franck[1], MACCHIONI Nicola[2]

[1]Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
[2]IVALSA, Florence, Italy
julia.buchner@ecoledubois.fr

Key words: Untreated wood; natural weathering; artificial weathering; surface roughness

Context

The aim of the project is to identify any synergistic effects between biotic factors such as bacteria (*Actinomycetes* and *Eubacteria*) and fungi (*Basidiomycota* and *Ascomycota*) and abiotic factors such as light, temperature and moisture on the weathering of wood surfaces (*Quercus petraea* ,*Pseudotsuga menziesii* and *Castanea sp.*) in use class 3. It is expected that through the exposure of several wood species to different natural, as well as artificial, weathering techniques, each of the weathering parameters can be understood more clearly and especially the influence of biotic factors. Taking into consideration that the experiments are still ongoing, the main focus of this abstract is on the surface roughness before exposure to weathering.

Weathering techniques

Natural as well as artificial weathering methods, shown in Tab. 1, have been chosen for this weathering experiment. The weathering in artificial conditions might reveal the difference in terms of presence and types of microbes to natural weathering conditions as well as the impact of each of the weathering parameters. The artificial weathering procedures derive from the standard method EN 927-3, whilst the sub cycle "spray" is eliminated from the 2nd method and the irradiation in the 3rd method is altered from 0,89 to 1,55 W/m²/nm.

Tab. 1: Artificial weathering techniques

Weathering technique	Step	Function	Specification	Time [h]
EN 927 (UVSC)	1	Condensation	45±3 °C	24
	2	Sub cycle	Step 3+4 (48x)	144
	3	UVA-340	60±3°C, 0,89 W/m²/nm	2,5
	4	Spray		0,5
EN 927 without spray (UVC)	1	Condensation	45±3 °C	24
	2	Sub cycle	Step 3+4 (48x)	144
	3	UVA-340	60±3 °C, 0,89 W/m²/nm	2,5
	4	Idle		0,5
EN 927 with higher irradiation (UVASC)	1	Condensation	45±3 °C	24
	2	Sub cycle	Step 3+4 (48x)	144
	3	UVA-340	60±3 °C, 1,55 W/m²/nm	2,5
	4	Spray		0,5

Measurements

The wood surfaces are observed before and after the application of the weathering techniques at the exact same area of the sample. According to Žlahtič et al. (2016), 1000 h of artificial weathering can be compared to 6 months outdoor weathering. Even though this statement might not be true in every climate, comparative weathering times were chosen, hence the naturally weathered samples will be exposed for 1 and 2 years. Weather conditions are recorded throughout the exposure of the samples.

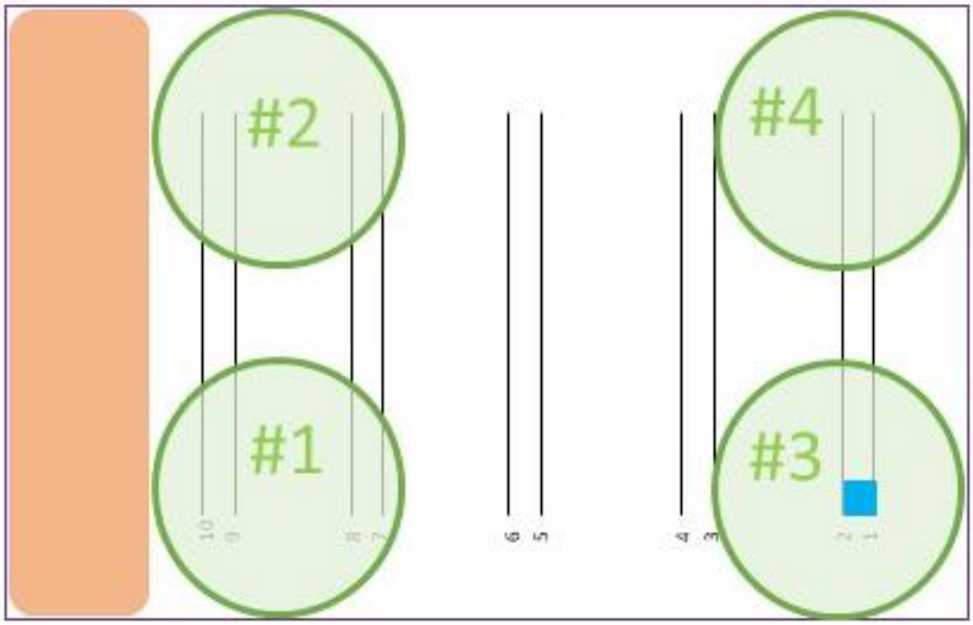


Fig. 1: Sketch of a sample showing the areas of measurements: Black lines= surface roughness measurements (#1-10), blue square= ESEM, green circles= colour (#1-4), purple surrounding= visual observation and FTIR, orange rectangle= microbiological methods

The surface roughness is measured with a stylus MarSurf XT20 instrument (MAHR Göttingen GMBH). The measuring speed of 0,5 mm/s and the scanning force of 0,7 mN is applied. The roughness profiles are obtained by scanning 45 mm of the wood samples perpendicular to the grain, as shown in Fig. 1. The following roughness parameters are used:

R_a/ P_a/ W_a: Measurements of the surface show the unfiltered primary profile (P - profile). The use of a filter according to the standard ISO 16610-21 (ISO 16610-21 2012) produces the waviness profile (W – profile) and the roughness profile (R – profile). The arithmetic mean deviation R_a is one of the most commonly used parameters since it gives a good general description of height variations. This value is not sensitive to small profile changes and it does not differentiate between peaks and valleys and has therefore a weak information character (Gadelmawla et al. 2002).

P_t/ W_t: These parameters show the height between the deepest valley and the highest peak within the evaluation length (ISO 4287 1998) ("P" for the unfiltered primary profile and "W" for the filtered waviness profile). These values are sensitive to debris on the surface and large anatomical features such as cracks.

R_{pk}: The reduced peak height is the average height of the protruding peaks above the core roughness profile (R_k). This value is sensitive to outlying irregularities such as fuzziness (Gurau et al. 2017). Therefore, it is hoped that the R_{pk} be used to follow surface degradation.

R_{sk}: This values shows the skewness of the roughness profile. It is used to measure the symmetry of the profile. R_{sk} is strongly influenced by occasional deep valleys or high peaks. This parameter can be used to distinguish between profiles having the same R_a value but with different distributions of valleys and peaks (Gadelmawla et al. 2002).

R_{ku}: The kurtosis of the roughness profile describes the sharpness of the probability density of the profile. If $R_{ku} < 3$ the profile shows only few high peaks and low valleys. Values > 3 indicate isolated deep valleys and peaks (Gadelmawla et al. 2002). This parameter can help identify anatomical features of wood such as vessels.

Observation under the **environmental scanning electron microscope** (ESEM) allows a microscopic observation of the evolution of the surface degradation in the exact same area. Degradation such as micro-cracking, contamination by microorganisms as well as pollutants can be examined.

The colorimetry will be used to show changes in **colour** of the wood samples before weathering compared to naturally or artificially weathered samples after different times of exposure. The CIE Lab colour coordinates (SPIN) are measured with the XRite C64i. On each sample 4 measurements are taken in each corner as shown in Fig. 1. The moisture content (MC) is measured with a capacitance moisture meter at the same time the colour is measured, since pre-tests showed a correlation between colour and MC. Note that the exact MC will be determined by oven drying at the end of experiment because high temperatures of the oven are likely to change the wood chemistry.

The wood surfaces will also be **scanned** with a Ricoh MP C6502 scanner with a resolution of 600 dpi in order to record the visual appearance of the whole surface. The number and size of cracks as well as the presence of any inhomogeneous discoloration zones due to microorganisms will be observed.

The **Fourier transform infrared spectroscope** (FTIR) will detect chemical changes, if any, over the exposure period. Spectra from three chosen areas (within the late wood and early wood areas) will be recorded. Each spectrum is further processed for baseline correction and smoothing. An average spectrum of the three individually recorded ones will be calculated.

In order to observe the **microbiological contamination** of the untreated wood surfaces, after exposure of the samples, the orange area in Fig. 1 will be scratched off with a razor blade and the dust will be placed in a saline buffer. After incubation, vortexing and McFarland measurements, 200 µl of the suspension will be pipetted on to the agar. After several days of incubating the dishes at 30 °C, the number of fungal and bacterial colonies will be counted. The colonies will be transferred multiple times onto new petri dishes in order to gain pure cultures. Once a pure culture has been obtained, the identification of the microorganisms can take place.

Results

Taking into consideration that the experiments are still ongoing, only parts of the measurements are shown and the main focus is on the surface roughness of wood surfaces before natural and artificial weathering. The results of the measurements are shown in Tab. 2.

The arithmetic mean deviations reveal that the chestnut surfaces show in all three cases always the highest value. The R_a in Douglas fir is the lowest whilst in P_a and W_a the oak samples show the lowest values. This indicates that the roughness of the hardwood species is higher compared to the softwood species but the waviness as well as the primary profile do not show any trend that could lead back to anatomical differences between soft- and

hardwoods. The P_t parameter indicate lowest values for Douglas fir followed by oak and chestnut. The total height of the waviness shows lowest values for oak followed by Douglas fir and chestnut. The Rsk shows for all three wood species values < 0 which indicates fairly deep valleys below a plateau. This finding is reinforced with the Rku parameter, which shows values bigger than 3 in all three wood species. Observing the Rpk, one can conclude that Douglas fir shows the highest outstanding peaks compared to both of the hardwood species. The specimens of all wood species were prepared in the same way and so the differences in roughness are due anatomical differences and mechanical responses to the cutting tool.

Tab. 2: Surface roughness of wood surfaces before exposure to weathering

	R_a	**P_a**	**W_a**	**Pt**	**Wt**	**Rsk**	**Rku**	**Rpk**
Pseudotsuga menziesii	6,3	20,7	18,8	155,9	104,5	-0,5	12,1	15,4
Quercus robur	7,5	17,5	13,8	179,3	69,3	-3,3	20,5	12,6
Castanea sp.	9,9	32,5	29,0	247,1	129,9	-3,5	21,5	11,9

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the support of the Transylvania University of Brasov and especially Prof. Lidia Gurau.

References

Gadelmawla E, Maksoud TMA, Elewa I, Soliman H (2002) Roughness parameters. J Mater Process Technol 123:133–145. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2

Gurau L, Irle M, Campean M, et al (2017) Surface Quality of Planed Beech Wood (Fagus sylvatica L.) Thermally Treated for Different Durations of Time. BioResources 12:1930–2126. doi: 10.15376/biores.12.2.4283-4301

ISO 4287 (1998) Geometrical Product Specifications (GPS)- Surface texture: Profile method- Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization

ISO 16610-21 (2012) Geometrical product specifications (GPS)- Filtration- Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. International Organization for Standardization

Žlahtič M, Humar M (2016) Influence of Artificial and Natural Weathering on the Hydrophobicity and Surface Properties of Wood. BioResources 11:4964–4989. doi: 10.15376/biores.11.2.4964-4989

Poster D17

Direct DRAQ5 DNA staining on sterilized and contaminated wood surface, investigation by confocal microscopy

MUNIR Muhammad Tanveer[1], OUMAROU MAHAMANE Ismaël[2], DUBREIL Laurence[3], FEDERIGHI Michel[2], AVIAT Florence[4], PAILHORIÈS Hélène[5], EVEILLARD Matthieu[5] BELLONCLE Christophe[1]

[1]LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois, 44300 Nantes, France
[2]Hygiène et qualité des aliments, Oniris, 44300 Nantes, France
[3]PAnTher, INRA, Oniris, 44307 Nantes, France
[4]ATOMycA, Inserm Equipe Avenir, Université Bretagne-Loire, Angers, France
tanveer.munir@ecoledubois.fr

Keywords: Contact surfaces, DRAQ5, *Escherichia coli*, environmental health, confocal microscopy, wood, hygiene

Context and objectives

The wood is used as a contact material in many hygienically sensitive places like hospitals (Pailhoriès et al., 2017) and food preparation surfaces (Aviat et al., 2016). The porosity of this material has always been doubtful regarding retention of organic material and microbes which may pose a hygienic risk. Therefore, the direct observation of presence of microbes on this material can give an idea about the safety of this material (Dubreil et al., 2018). A novel experiment was done to directly deposit the DRAQ5 solution on the wood to see if it differentially labels the DNA of wood and bacteria, depending upon sterilization and time of incubation, which can be observed under confocal microscope.

Materials and methods

The selected wood samples were 10 mm discs obtained from oak (Quercus petraea) and poplar trees. The prepare these samples, the boards of wood with moisture content of 12 % were cut by an electric saw (Altendorf-F45, Minden, Germany) into 3.5 - 4.5 mm sheets in transversal (RT) and tangential (LT) directions. These veneers of wood were used to prepare 10 mm wooden circular discs using a laser cutting machine (Trotec-SP500 C60, Wels, Austria) or manual method using a punch (Syrette Syderic ET23N). Further, the samples were kept in unsterilized and sterilized (autoclaved at 121°C for 15 minutes at 1 bar pressure or gamma irradiated at 25kGy) form.

The suspension of E. coli was prepared at 1.7 McF (DEN-1, Grant Instruments (Cambridge) Ltd, U.K.) in PBS+EDTA solution (20 mM with 20EDTA/80PBS). 20µL of this suspension was inoculated on the center of wooden discs which were considered as bacteria inoculated group, while the other group of wood discs was kept without bacterial inoculation.

The DRAQ5™ (BioStatus Limited, U.K.) was diluted in PBS (1.5: 200) and 20µL of this solution was deposited on sterilized and unsterilized poplar and oak wood with or without pre-inoculated bacteria. Moreover, the incubation time for labeling DRAQ5 on wood incubated with E. coli and wood without bacteria was also tested for 10 minutes and two hours.

Wood specimens were placed on microscope slides cover glasses of a PBS support and observed under inverted laser scanning microscope (LSM780, Zeiss, Germany). The 405 nm laser excitation was used to generate auto-fluorescence of wood and 633 nm laser wavelength

was used to excite DRAQ5™. Images were observed in spectral mode by using 32 GaAsps detectors between 405 nm and 665 nm to get the specific spectral signature of wood autofluorescence and DRAQ5™ labeled DNA. Images were then analyzed by using the module online fingerprinting. This innovative module allows the recording, analysis and separation of emission signals of wood autofluorescence and DRAQ5™ fluorescence emission. Autofluorescence spectra of the poplar and oak were acquired from unlabeled wood samples. DRAQ5™ spectra was acquired from DRAQ5™ labeled bacteria solution.

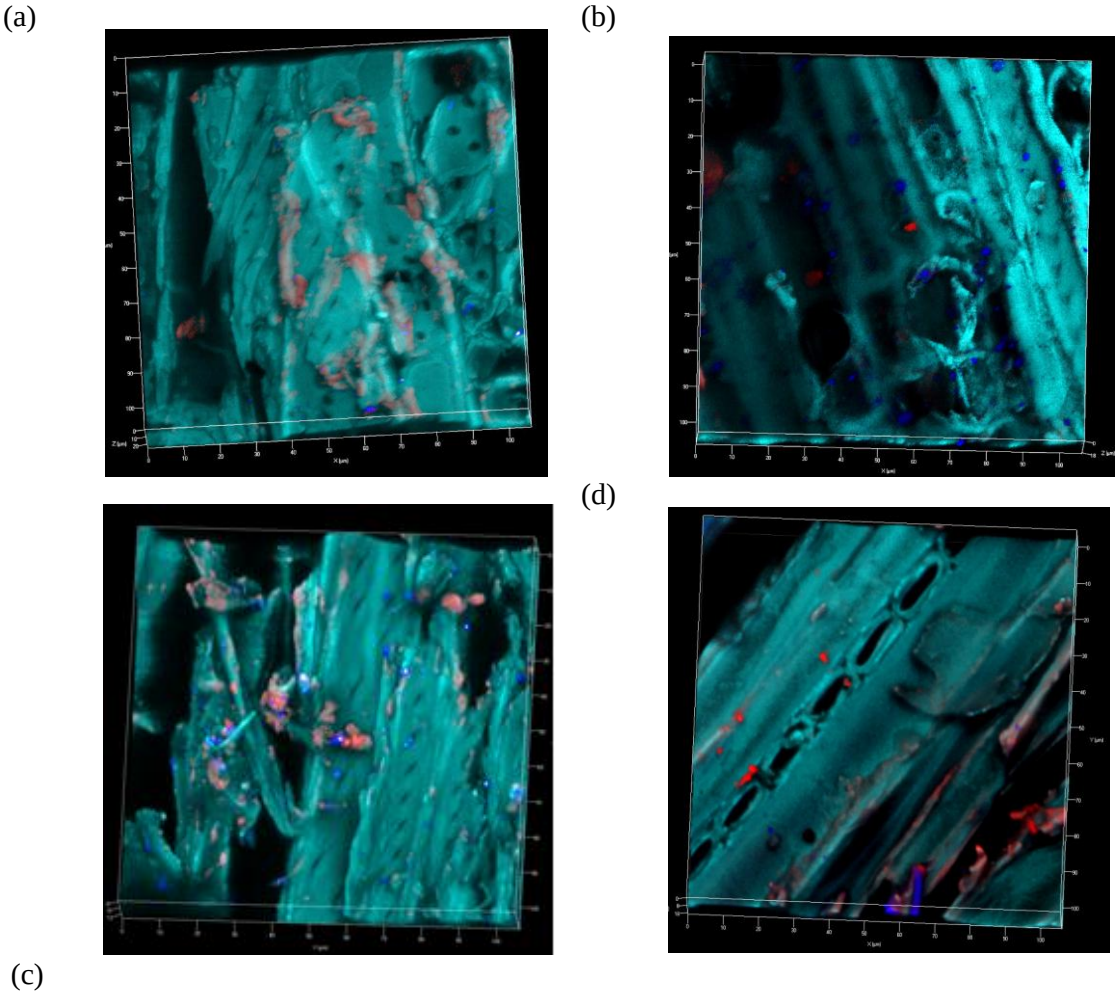


Fig. 1: Confocal spectral image of wood labeled with DRAQ5. (a) Autoclaved oak (b) Gamma sterilized oak (c) Non-sterilized oak (d) Poplar gamma sterilized and then kept in non-sterile conditions (positive control)

DRAQ5 Contaminants/Extractives Wood

Results and discussion

The direct DraQ5 staining of sterilized (autoclaved or gamma irradiated) and non-sterilised wood emitted a fluorescence of DRAQ5 under confocal microscope (Fig. 1), which means that the probe bound with the DNA present in wood. Moreover, there were no significant differences observed in all spectral images irrespective of their sterilization status which depicts the fact that different sterilization methods do not completely destroy the DNA of wood (Fig. 1).

The spectral images obtained from the samples which had pre-inoculation of E. coli are shown in Fig. 2. When comparing these images, it cannot be justified if the DRAQ5 differently colors the DNA of bacteria or the wood. Additionally, the time difference (10 or 120 minutes) given to DRAQ5 to interact with bacterial cells, is also non-significant factor. Therefore, labeling of bacterial cells with DRAQ5 has similar value at different times so 10 minutes can be given to achieve the significant coloration.

Theoretically, it was expected that the gamma sterilization degrades the DNA (Harrell et al., 2018) present on wood, however, current findings negate this hypothesis, therefore it can be expected that even the sterilized wood has traces of DNA which can influence the genetic studies of microbes on wood. However, it will be interesting to see if these sterilizations are influencing the genetic identification of wood.

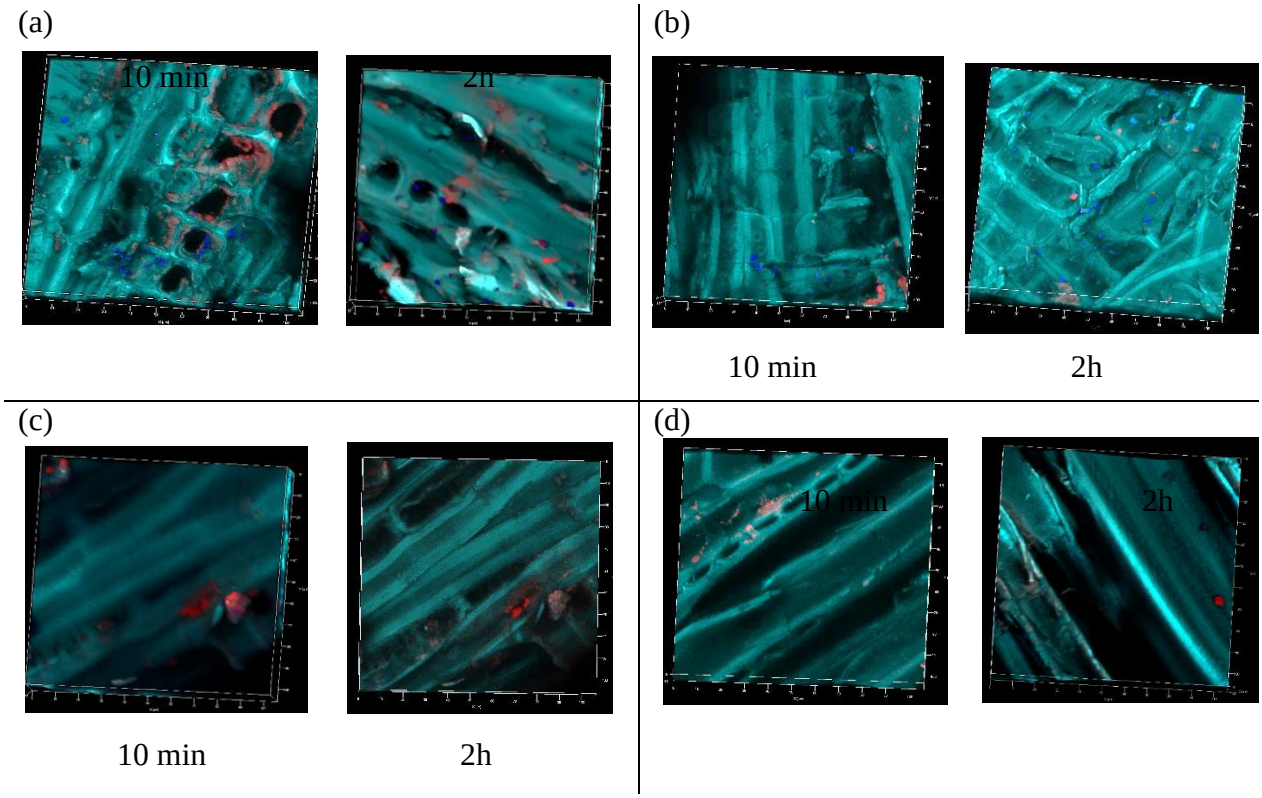


Fig. 2 : DRAQ5 staining of wood incubated previously with unlalebeld *E.coli*, bacteria incubatio time of 10 min and two hours: (a) Autoclaved (AC) oak (b) Gamma sterilised oak (G) oak (c) non sterilized (NS) oak (d) Poplar gamma sterilized and then kept in non-sterile conditions (positive control)

Conclusion

These observations indicate that it is not interesting to use DRAQ5 directly staining on wood to detect specifically presence of bacteria. The similar amount of DNA bound to DRAQ5 in different type of sterilised wood indicated that the sterilisation methods do not completely demolish the nucleic acid present on surfaces.

Acknowledgment

This research was funded by CODIFAB. Confocal spectral microscopy was performed on Platform APEX UMR703. The bacteria were obtained from CHU Angers.

References

Aviat et al. (2016) Microbial Safety of Wood in Contact with Food: A Review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 15(3): 491-505.

Dubreil, L., Aviat, F., Anthoine, V., Ismail, R., Rossero, A., Federighi, M., (2018) Confocal spectral microscopy—an innovative tool for tracking of pathogen agents on contaminated wooden surfaces. Eur. J. Wood Wood Prod. 76, 1083–1085.

Harrell CR, Djonov V, Fellabaum C, Volarevic V. (2018) Risks of Using Sterilization by Gamma Radiation: The Other Side of the Coin. Int J Med Sci; 15(3):274-279.

Pailhoriès et al. (2017) Oak in Hospitals, the Worst Enemy of Staphylococcus aureus? Infection Control & Hospital Epidemiology 38(3): 382-384.

Poster D18

Etude de faisabilité d'un système d'attache résiliente en bois

CHUMAK Ksenia[1], BRUNET Louis-Patrick[1], KONOVALOV Andrei[1], LEFEBVRE Cédric[1], MICHAUD Franck[2]

[1] Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
[2] Laboratoire Innovation Matériau Bois Habitat Apprentissage (LIMBHA), Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
franck.michaud@ecoledubois.fr

Mots clefs : attache résiliente, clip, bois massif, fatigue.

Contexte et objectifs

La démocratisation d'ateliers de fabrication partagés (Fablab et autres) associée à la mise à disposition de nouvelles technologiques de transformation du bois telle que la découpe laser conduisent à l'apparition de structures complexes dans la conception d'objets en bois ou en composites à base de bois. La facilité d'accès et d'usage de ces techniques ouvre un large champ des possibles et se traduit par une multitude de tentatives et de réalisations. Toutefois, ce sont davantage des démarches empiriques, éparses avec principalement une transmission de l'ordre de la pratique. Ce constat nous a conduit à chercher comment relier la conception de ce type d'assemblage bois (Gaugner, 2003) à des éléments théoriques, aux caractéristiques des matériaux utilisés et aux sollicitations envisagées. Pour restreindre le champ d'investigation, le choix s'est porté sur un assemblage résilient et plus particulièrement sur l'étude de faisabilité d'un « clip » en bois. On pense ici au fermoir attache rapide usuellement en plastique que l'on retrouve au quotidien sur un sac à dos, tour de cou, colliers ou autres objets. Une recherche bibliographique (Lefebvre et al, 2017) a permis de mettre en évidence que le matériau en usage est un plastique avec des exigences spécifiques en fonction de l'utilisation et qu'il n'existerait pas de produit bois de ce type. Le fermoir pris comme référence (Fig. 1), et le plus répandu, est de type « fastex ». Les deux principales questions de cette étude sont :

- Est-il faisable de réaliser un fermoir/attache rapide résilient en bois qui soit fonctionnel ?
- Peut-on identifier des relations entre les caractéristiques du matériau, la géométrie et la performance de ce système résilient ?

Matériels et méthodes

Afin d'obtenir de premiers résultats il a été choisi d'aborder ce type de forme complexe de façon simplifiée. Il est ressorti que les principales sollicitations de l'attache sont (Fig. 2) :

- la résistance à la fatigue en flexion qui confère la résilience et prévaut lors de la phase de fermeture de l'attache
- la résistance à la traction de l'ensemble (induisant un cisaillement local) lors de la phase où l'attache est fonctionnelle (en service)

Après étude de la conception des attaches, le modèle presenté figure 3 a été choisi avec 3 alternatives de dimensionnement (Tab. 1) basées sur les 4 règles suivantes :

- Xa>Xc, la partie Xa doit être strictement supérieure que partie Xc, sinon le clip ne s'ouvrira pas.

- (Largeur total – largeur de la partie central) /2 = largeur de la partie latérale. Cette règle permet de déterminer la largeur de la partie latérale.
- Xa+Xb+Xc=X=10 mm, la somme doit être égale à la largeur vue dans la règle 2.
- Xd<12 mm, pour avoir un bon compromis entre le point de rotation, la partie amovible et le cran d'arrêt.

Fig. 1 : Attache commerciale (clip)

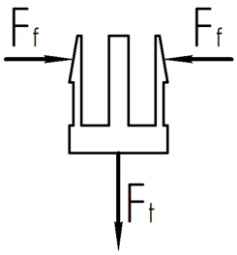


Fig. 2 : Sollicitation partie mâle du clip

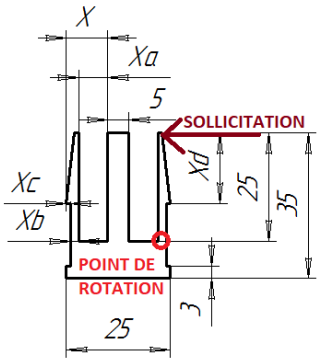


Fig. 3 : Dimensions et schématisation du clip testé

Le focus est fait sur la partie mâle d'une attache ayant une base de 25mm de large et 5mm d'épaisseur (correspondant à une dimension moyenne de cet objet commercial) ce qui conduit aux spécifications suivantes Ft=600N et Ff=42N (Fig. 2). Ce dimensionnement est celui appliqué (CCTP) et proposé par certains distributeurs de clips (www.stickbox.ru et www.equip.ru). Il est à noter que le cycle de vie de ces clips plastiques ne dépasse pas les 10 000 utilisations. En se basant sur la théorie des poutres et les principes de la RDM, les caractéristiques et sections ont ainsi été déterminées.

Un plan d'expérience à 2 facteurs et 3 niveaux a été réalisé. Les facteurs sont la **matière première (type d'essence)** et le **type de dimensionnement de l'assemblage (Tab. 1)**. 3 répétitions ont été effectuées.

Tab. 1 : Typologie de dimensionnement de la partie male du clip bois

Dimensionnement (en mm)	Type 1	Type 2	Type 3
Xa	4	5	6
Xb	2,3	2,1	2
Xc	3,7	2,9	2
X=Xa+Xb+Xc	10		

Les essais de traction ont été réalisés sur un banc d'essai (machine universelle MTS) dans des conditions standard de laboratoire. Les essais de fatigue par fermeture/ouverture (sollicitation en flexion) ont été réalisés manuellement sur une durée de 30 minutes (minimum de 1000 cycles) ou jusqu'à rupture dans des conditions usuelles d'une pièce d'habitation non contrôlée.

Les échantillons ont été réalisés dans du bois de chêne (*Quercus spp*), de châtaigner (*Castanea sativa*) et de douglas (*Pseudotsuga menziesii*) pour leurs propriétés (une contrainte en cisaillement supérieur à 7 MPa et des modules en flexion allant respectivement de 14500 à

8200 MPa). Le bois sélectionné (Benoit, 2007) est sans défauts de classe C24 ou D24, la découpe s'est faite avec une grande précision (0,1 mm) et répétabilité (<15 µm) grâce à la machine laser (TROTEC).

Résultats et discussion

Les résultats des essais de traction (Fig. 4) montrent que l'impact du type de dimensionnement n'est pas un paramètre très discriminant alors qu'au contraire l'essence de bois au travers ces caractéristiques, sa variabilité et sa densité influence fortement la force maximale en rupture. La figure 4 présente les valeurs moyennes sur 3 répétitions et une force spécifique qui est la force rapportée à la masse de l'échantillon sachant que tous ont un volume et une géométrie identiques (NB : on observe un coefficient de corrélation de 0.89 entre la force à rupture et la masse). Le douglas peu dense est moins résistant au cisaillement et présente une plus grande variabilité que l'on peut imputer en partie aux fortes transitions anatomiques dans, et entre les cernes d'accroissements annuelles (souvent larges pour cette essence).

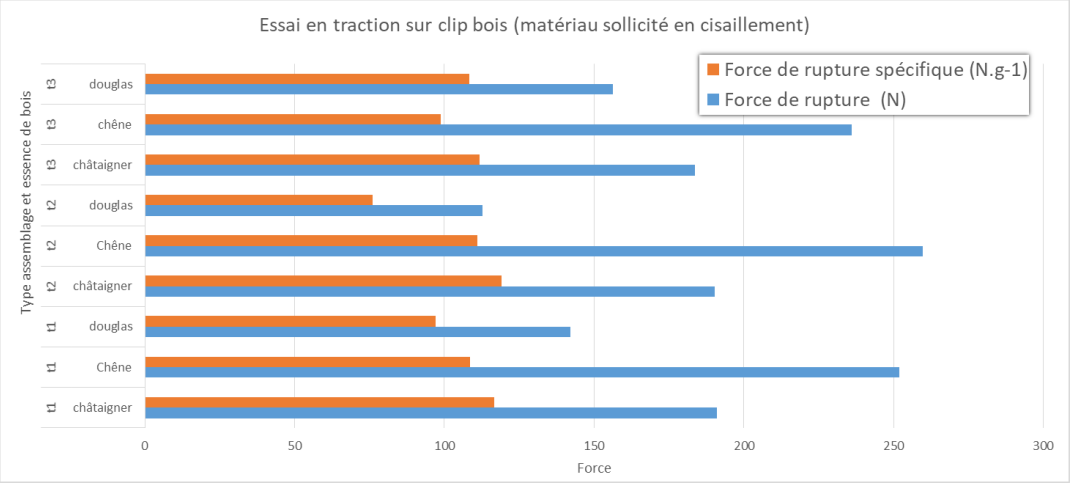


Fig. 4 : Résultat de l'essai en traction du clip (en cisaillement du bois)

Les résultats des essais de fatigue (flexion) lors d'assemblages répétés (Tab. 2) montrent que seuls les échantillons de configuration type1 en bois de chêne remplissent les objectifs et sont fonctionnels. En effet, il faut une certaine section pour absorber la concentration de contrainte que l'on peut observer au niveau de la rotation (considéré comme un « encastrement », Fig. 3) et la plus grande densité du chêne lui confère un module de flexion plus élevée.

Tab. 1 : Test de fatigue à l'ouverture/fermeture (sollicitation en flexion locale)

Matériau	**Chêne**			**Châtaigner**			**Douglas**		
Forme	Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3
Temps avant casse, t (min)	30	30	0.1	0	0	0	30	0	2
Nombre des ouvertures-fermetures, N	1020	1020	1	1	1	1	1020	1	68
Commentaires	Rien à signaler	Sortie de la zone élastique 1 ère utilisation	Cassure pendant 1ere utilisation Fissure à 45° par rapport au fil pour le chêne Fissure suivant le fil pour le châtaigner				Cassure De 1 ou 2 mm	Cassure pendant 1ere utilisation (dans le sens du fil et des cernes)	Cassure au bout de 2min

Ces premiers résultats et observations amènent à reconsidérer la géométrie des pièces mâles et des parties mobiles. Deux nouvelles géométries ont été conçues et réalisées.

La première (Fig. 5) a pour objectif d'augmenter les possibilités de flexibilité de la pièce mâle via des fentes et une double rotation. Ce choix permet d'augmenter la flèche avec une plus grande section (et donc une meilleure résistance du matériau). Les fentes jouent, elles ici, le même rôle que pour un contreplaqué cintrable par exemple. Les essais préliminaires montrent de bons résultats pour ce design. La seconde géométrie (Fig. 6) se focalise sur la zone de concentration de contraintes qui passe d'un design abrupt (angle droit) à un angle plus doux et un gradient quant à la section de la partie mobile. Cette dernière augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone de rotation. Encore une fois, les premiers tests sont prometteurs et l'attache apparaît fonctionnelle.

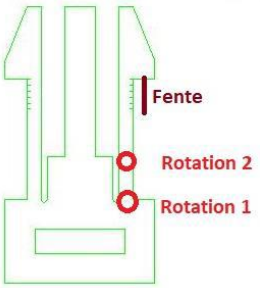


Fig. 5 : Géométrie 2 avec fentes et doubles rotation

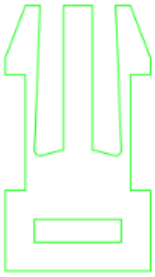


Fig. 6 : Géométrie 3 avec adoucissement de l'angle

Fig. 7 : Visuel d'une attache résiliente bois

Conclusion

Par cette étude, il a été démontré la possibilité de réaliser une attache résiliente bois de type clip. Nous avons pu relier, pour partie, l'assemblage aux caractéristiques matériaux et géométriques et proposons les éléments de conception suivants : un bois débité sur dosse avec un module de Young élevé en flexion est un bon compromis matériau ; la géométrie doit intégrer dans la partie mobile de l'élément mâle une épaisseur réduite et une longue portée ; la zone élastique des parties mobiles mâles doit être supérieure à la demi-largeur de l'ensemble ; la zone qui lie la partie mobile à l'ensemble de l'élément mâle doit présenter un angle non abrupt pour éviter toute rupture à cette base. Une prochaine étape serait de vérifier la faisabilité industrielle de ce type de dispositif et d'investiguer de potentiels effets d'échelles.

Remerciements

Travail réalisé dans le cadre d'un projet d'étudiants de seconde année de la formation ingénieur de l'Ecole Supérieure du Bois avec l'appui technique de M. Sébastien RINCÉ.

Références

Benoit Y. (2007) Le guide des essences de bois, Eyrolles FCBA, 148 pages.

Gaugner W. (2003) Assemblage du bois Europe Japon face à face, Editions VIAL,

Lefebvre et al (2017) Etude d'un système résilient bois. Rapport final projet PRTT, 13pages, Ecole Supérieure du Bois.

Poster D19

Les Structures bois dans l'environnement Guadeloupéen, projet Bois Duramhen 971

FOURNELY Eric[1], QUISTIN Paul[2], BARGY Jean-Mikhaël[1,2], GRIL Joseph[1], GODI Gaël[1], CADOR Luc[3], LAMADON Thierry[4], ROMANA Laurence[5]

[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France
[2]ANCO971, Guadeloupe, France
[3]S3CB, Guadeloupe, France
[4]Bureau Veritas, France
[5]Université Antilles, UA, France
eric.fournely@uca.fr

Mots clefs : Température ; Humidité relative ; Bois en œuvre ; Résineux ; Bois tropical ; Classe de service

Contexte et objectifs

Les structures en bois des Antilles françaises sont, par défaut, considérées de classe de service 3 (Eurocode 5 2005, Eurocode 5/NA 2007). Cette décision est basée d'une part sur le climat sévère des îles de l'arc caribéen, et d'autre part sur le manque de données sur le climat local et ses conséquences sur les bâtiments en bois et leurs éléments. Le projet européen Synergîle Bois Duramhen 971, ainsi que le programme national PACTE Bois Duramhen 972 ont pour objectif de combler ces lacunes respectivement pour la Guadeloupe et pour la Martinique. L'objectif est de constituer une base de données entre autre orientée sur température (θ) et humidité relative de l'air (*HR*) localisées, et teneur en eau des bois en valeur instantanée ou en valeur d'équilibre. Le but final est d'établir une carte distinguant une classe de service 2 et 3 (SC2 & SC3) pour des ouvrages en bois pouvant être considéré abrités. Le travail rapporté ici est uniquement relatif à l'archipel guadeloupéen (16-17°N, 61-62°W). La Fig. 1 présente l'archipel, le zonage climatologique (*MFZ*) défini par Météo France (MF), la position des stations MF et la position des principaux sites *DB971* choisis, intégrant des bois résineux et des bois tropicaux. La stratégie d'étude retenue est la suivante :

- identification des données MF disponibles ;
- choix d'une centaine d'ouvrages ou "sites" répartis sur l'île et variés dans leur conception ;
- mesures de *HR*, θ sur les sites et teneur en eau "instantanée" des bois des éléments MC_i sur les différents sites (≈250 éléments, ≈500 faces) pendant 18 mois ;
- analyse et exploitation des données en suivant notamment la démarche utilisée précédemment en métropole.

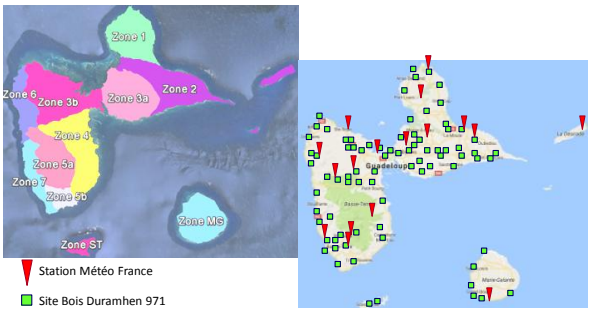


Fig.1 : Zones climatiques, stations Météo France et sites BD971 en Guadeloupe

Méthodologie de l'étude

Après avoir établi une liste des essences de bois communément utilisées, trois phases sont définies pour l'étude : acquisition des données, analyse des données et enfin détermination des zones de classe de service (Quistin et al. 2017). L'acquisition des données repose sur deux sources:

- l'ensemble des mesures fournies par les stations MF (principalement *HR* et θ de l'air ambiant, d'autres paramètres sont disponibles mais non étudiés ici) ;
- des mesures sur des sites de *HR* et θ et également de teneur en humidité des bois MC_i.

Les sites sont choisis pour être représentatifs des zones bâties et également pour couvrir les différentes zones climatiques (*MFZ*).

L'analyse des données est divisée en plusieurs étapes. L'étape 1 consiste à déterminer la teneur en eau du bois d'équilibre à partir de *HR* et θ de l'air obtenues par MF. L'objectif de l'étape 2 est le même en ce qui concerne les *HR* et θ obtenues par des mesures sur les sites *BD971*. L'étape 3 est consacrée à la comparaison et à la compatibilité ou cohérence de ces deux approches. Aux étapes 4 et 5, la teneur en humidité du bois, respectivement sur les bois résineux et les bois tropicaux, est mesurée sur les sites et analysée.

Enfin, les résultats de ces différentes étapes sont comparés, analysées pour dégager des zones homogènes pour ces paramètres environnementaux liés aux classes de service des constructions en bois. La Fig. 2 donne une vue synthétique de cette stratégie (Bargy 2017, Quistin et al. 2016).

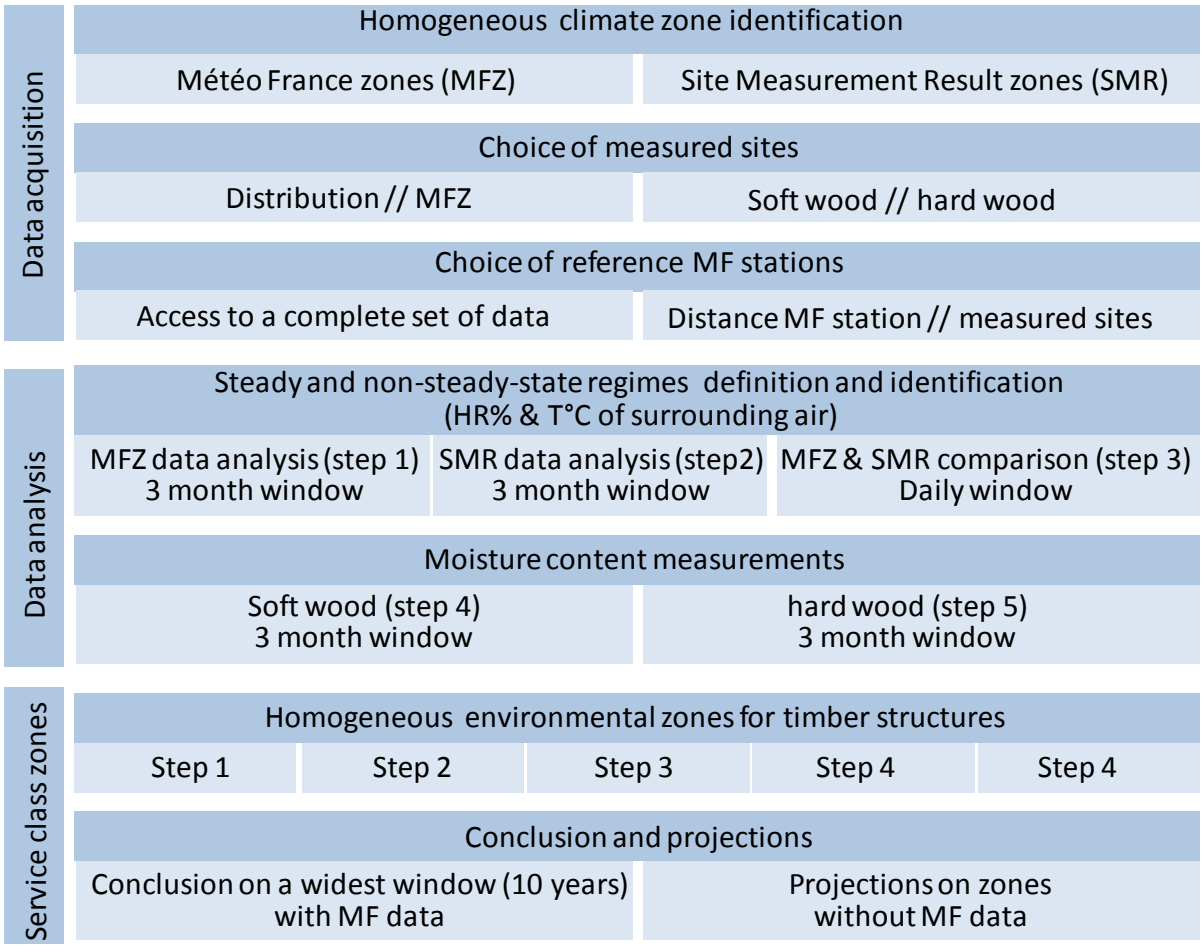


Fig. 2: Méthodologie de l'étude

L'humidité relative et la température de l'air sont mesurées par un humidimètre FLUKE 971. La teneur en eau est obtenue sur site par mesure indirecte capacitive avec un MERLIN EVO SM 25. La calibration de ces appareils est obtenue par comparaison avec des mesures directes en laboratoire et (ou) par comparaison avec des mesures *MF* pour des sites implantés à proximité des stations *MF* (Peterson 2008). Pour chaque site d'une même zone *MFZ*, la teneur en eau des bois est mesurée MC_i et calculée *MCE*. Une valeur moyenne sur un mois est calculée.

Premiers résultats et discussion

La Fig. 3 présente un exemple de résultats pour des éléments en bois tropicaux de la zone *MFZ* 4. C'est dans celle-ci que les plus grandes variations de *MC* on été obtenues (Brévignon 2005) : une partie est en altitude avec des parties boisées, une grande partie est en versant orienté est, une partie appartient au littoral atlantique ; une explication à la variabilité de *MC* peut être trouvée dans ces paramètres. Cette zone *MFZ*4 devra être scindée en plusieurs parties pour le classement SC2 et SC3. Actuellement, 12 mois de mesure sont disponibles ; l'analyse finale pour ce projet nécessite encore des résultats complémentaires avant de présenter une carte correctement argumentée (Lamadon 2017).

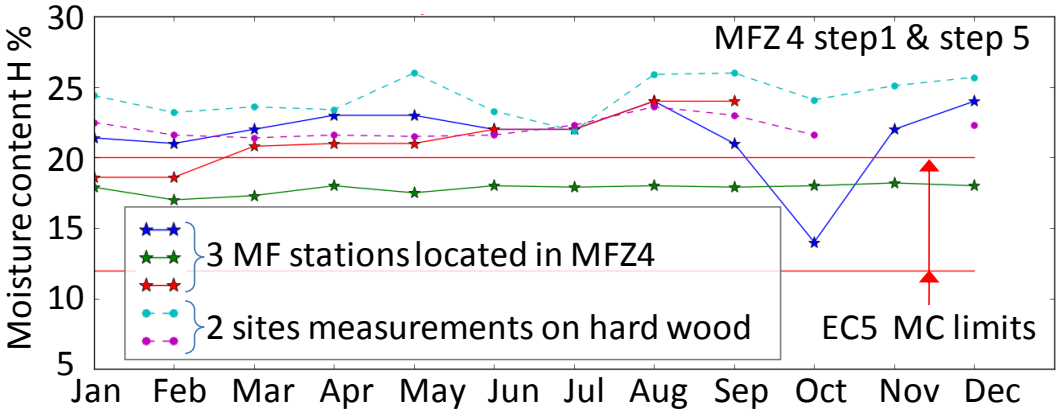


Fig. 3: Teneur en eau de bois tropicaux (calcul et mesures) pour des sites en *MFZ* 4 (Quistin et al 2018)

Conclusions et perspectives

L'obtention de résultats par différentes approches (expérimentales sur site et calcul à partir de données environnementales sur site ou issues de la base de données MF), la comparaison de ces résultats, la calibration des appareils de mesures, les travaux non explicités ici de recherche de points de cohérence sur le(s) diagramme(s) d'équilibre hydrique des bois ou du monitoring sur un des 100 sites retenus, ont permis la construction d'une large base de données sur l'état de teneur en eau des bois en œuvre dans les constructions en Guadeloupe. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour aboutir à une cartographie de l'archipel pour un classement en classe de service 2 et 3, ainsi que pour de prochaines études pour une meilleure intégration des bois tropicaux dans l'environnement normatif des Eurocodes et d'une manière plus générale pour l'intégration pertinente et quantifiée dans des structure du GC.

Remerciements

Ce travail est soutenu et financé par le projet Européen FEDER Guadeloupe, certifié par le pôle de compétitivité Synergîle. Une partie de ce travail est basé sur la base de données de Météo France.

Références

Bargy J.-M. (2017) Etude de l'humidité du bois mis en œuvre dans son environnement - application et expérimentation dans la Région Guadeloupe 971. Rapport de stage de master Génie civil, Polytech Clermont-Ferrand, 156 p.

Brévignon C. (2005) Atlas climatique, l'environnement atmosphérique de la Guadeloupe, de Saint-Barthélemy et Saint-Martin, Météo France, 92 p.

Eurocode 5/NA (2010) AFNOR, NF EN 1995-1-1/NA. Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois, part. 1-1 : généralités, règles communes et règles pour les bâtiments, Annexe nationale à la NF EN1995-1-1:2005, 10 p.

Lamadon T. (2017) Taux d'humidité et panneaux dérivés en service, Note de cadrage-Bois Duramhen 971, 5 p.

Lamadon T. (2017) Taux d'humidité et panneaux dérivés en service, Note de cadrage-Bois Duramhen 971, 5 p.

Peterson C. (2008) Hand Held Moisture Meters. Symposium Report, Fort Lauderlale, 19 p.

Quistin P., Fournely E., Cador L., Romana L. (2016) Bois Duramhen - durabilité, aménagement, humidité, environnement, 5èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Bordeaux, 8-10.11.16, pp. 187-188.

Quistin P. (2017) Bois Duramhen 971 - Technical report n°1, methodology of study, 08/2017, 52 p.

Quistin P., Fournely E., Bargy J.M., Cador L., Lamadon T., Romana L. (2018) Impact of environment on timber structures, Bois Duramhen 971, The case of Guadeloupe (FWI), WCTE 2018 Séoul (KR) 2018, 6 p.

Quistin P., Fournely E., Cador L., Lamadon T., Romana L. (2018) Bois Duramhen - Cadre Méthodologique Géneral, 06/2018, 30 p

Quistin P., Cador L., Fournely E., Godi G., Romana L. (2018) Compte-rendu de réunion n°7 Comité Technique Co Tech n°7 20/03/2018

Quistin P., Cador L., Fournely E., Godi G., Romana L. (2018) Compte-rendu de réunion n°8 Comité Technique Co Tech n°8 20 07/2018

Quistin P., Méthodologie-Analyse des Investigations CoTech n° 7 -20 03/2018

Poster D20

Les Structures bois dans l'environnement Martiniquais, projet Bois Duramhen 972

QUISTIN Paul[1], BOURGADE Oriel[1], FOURNELY Eric[2], PIPET Jean-Baptiste[1,2], GODI Gaël[1], GRIL Joseph[2], CADOR Luc[3], LAMADON Thierry[4], ROMANA Laurence[5]

[1]ANCO, Guadeloupe/Martinique, France,
[2]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France
[3] S3CB, Guadeloupe, France
[4]Bureau Veritas, France
[5]Université Antilles, UA, Guadeloupe,France
pquistin@anco971.fr

Mots clefs : Température ; Humidité relative ; Bois en œuvre ; Résineux ; Bois tropical ; Classe de service ;

Contexte et objectifs

Le classement des structures bois en classe de service 3 (Eurocode 5 2005, Eurocode 5/NA 2007) dans les Antilles françaises est essentiellement basé, d'une part sur le climat sévère des îles de l'arc caribéen, et d'autre part sur le manque de données sur le climat local et ses conséquences sur les bâtiments en bois et leurs éléments. Le programme national PACTE Bois Duramhen 972 et le projet européen Synergîle Bois Duramhen 971, ont pour objectif de combler ces lacunes respectivement pour la Martinique et la Guadeloupe. L'objectif est de constituer une base de données orientée principalement sur la teneur en eau des bois en valeur instantanée ou en valeur d'équilibre, la température (θ) et l'humidité relative de l'air (*HR*). L'objectif final est de justifier une carte distinguant des classes de service 2 et 3 (SC2 & SC3) pour des ouvrages en bois abrités. Le travail rapporté ici est relatif à l'île de la Martinique. La Figure1 présente l'île, le zonage climatologique (Z*MF*) établi par Météo France (MF), la position des stations MF utilisées pour l'étude et la position des principaux sites*BD972* choisis. Ces sites présentent des éléments en bois résineux et en bois tropicaux. La stratégie d'étude retenue pour cette étude est identique à celle suivie en Guadeloupe, avec identification des données MF disponibles, choix de 70ouvrages ou "sites" répartis sur l'île etreprésentatifs des zones bâties et des différentes zones climatiques (*ZMF*), mesures de *HR*, θ sur les sites et teneur en eau "instantanée" des bois des éléments MC_i sur les différents sites pour environ 200 éléments)pendant 13 mois, analyse et exploitation des données en suivant notamment la démarche utilisée précédemment en métropole.

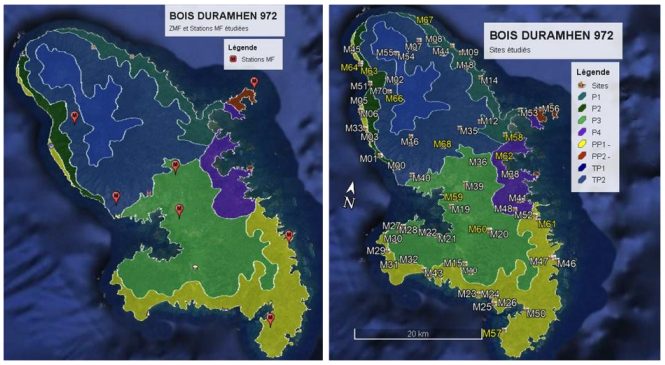


Fig.1 : Zones climatiques, stations Météo France et sites BD972 en Martinique

Méthodologie de l'étude

La liste des essences de bois communément utilisées s'appuie sur le travail déjà réalisé en Guadeloupe ; elle a été quelque peu modifiée en fonction des importations et usages des charpentiers implantés en Martinique. Trois phases sont définies pour l'étude : acquisition des données, analyse des données et enfin détermination des zones de classe de service (Quistin et al. 2017).

Les données sont acquises auprès de Météo France et sur sites BD972. L'ensemble des mesures fournies par les stations MF, notamment *HR* et θ de l'air ambiant, sont pris en compte dans cette étude. Les mesures sur sites sont composées de*HR* et θ et également de teneur en humidité des boisMC_i.

L'analyse des données est divisée en plusieurs étapes, identiques à celles présentées pour la Guadeloupe :

- étape 1, détermination de la teneur en eau du bois d'équilibre à partir de *HR* et θ de l'air obtenues par MF,
- étape 2, idem à partir des*HR* et θ obtenues par des mesures sur les sites*BD972*,
- étape 3, comparaison et vérification de cohérence de ces deux approches,
- étapes 4 et 5, mesure et calcul de la teneur en humidité du boisrésineux et tropicaux étudiés.

Enfin, les résultats de ces différentes étapes sont comparés, analysées pour dégager des zones homogènes pour ces paramètres environnementaux liés aux classes de service des constructions en bois. Il est analysé notamment l'influence de certains paramètrescomme le revêtement du bois(peinture,…), la proximité à la côte maritime et exposition au vent de mers…

Pour permettre de consolider les données recueillies et confirmer les hypothèses prises, des tâches complémentaires sont prévues(Quistin et al. 2018). Ces actions peuvent être regroupées comme suit :

a) Etuvage /Identification CIRAD :
   - Recensement des essences grâce aux fiches Cirad
   - Prise d'échantillons représentatifs sur sites pour identification CIRAD avec mesures de la masse volumique à température ambiante
   - Prise d'échantillons représentatifs sur sites pour passage en étuve avec mesure de la masse volumique anhydre
   - Calage du coefficient de correction de mesure de MC_isur site en fonction de l'essence (mesures directes de MC, de densités sèches et établissement des fonctions de corrélation des humidimètres.

b) Chambre climatique :
   Retrouver la correspondance avec les courbes d'équilibre hydrique. L'importance de la chambre climatique est qu'on pourra obtenir des données travaillant avec la teneur d'eau en équilibre et avec la teneur en eau instantanée moyenne, en plus du fait de travailler dans différents paliers de couples HR% / θ°C

c) Monitoring, validations des mesures de *MC %* et HR% &θeffectuées sur sites
   - Couverture spatiale faible : 1 Site
   - Période de récolte de données sur une faible échelle temps : 10 mois
   - Cadence de mesures élevée et mesures en continues : mesures toutes les heures
   - Bonne représentativité des essences bois et exposition (Abrité : intérieur, extérieur)

La Fig. 2 illustre ces complémentarités d'investigation qui permettent de consolider le projet en termes de représentativité et fiabilité des résultats.

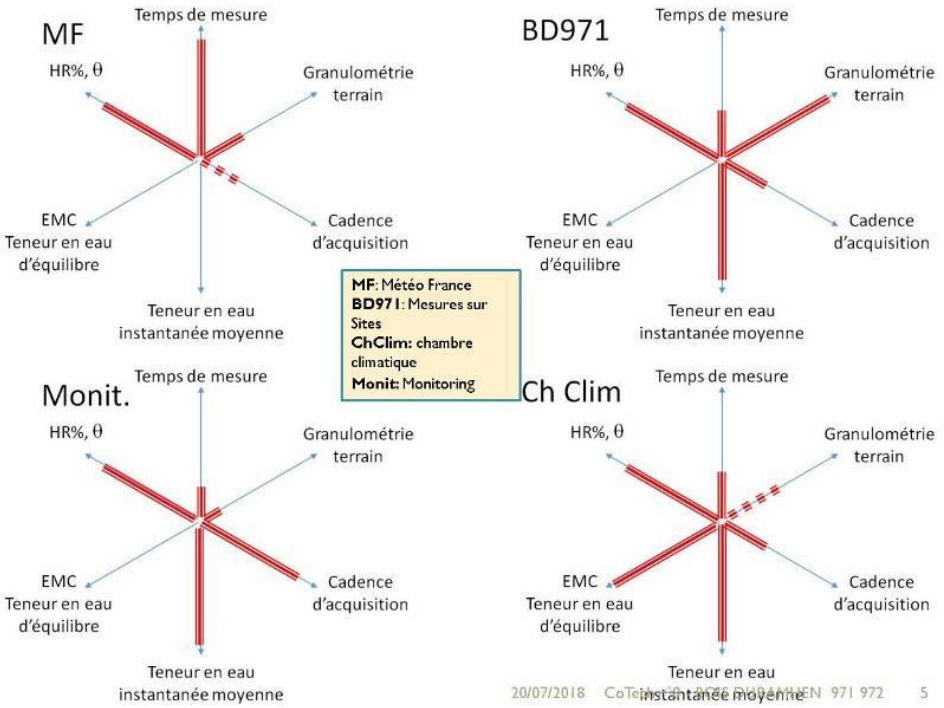


Fig. 2: Complémentarité de l'étude (Quistin et al 2018)

Premiers résultats et discussion

La Fig. 3 présente un exemple de résultats pour des éléments en bois situés dans des Sites à proximité de la mer et soumis pour certains d'entre eux au vent maritime (Alizé) venant de l'Est/Sud-Est. L'étude de l'influence du paramètre « proximité maritime et vent d'Est », montre que les éléments proches de la mer sur la façade maritime Ouest sont moins humides que ceux situés en façades Est et soumis donc aux Alizés.

Le paramètre « revêtement du bois » sera aussi abordé dans cet article car son influence sur les résultats est assez marquée. L'analyse finale des résultats de ce projet nécessite doncde tenir compte de ces paramètres singuliers avant de présenter une carte globale correctement argumentée.

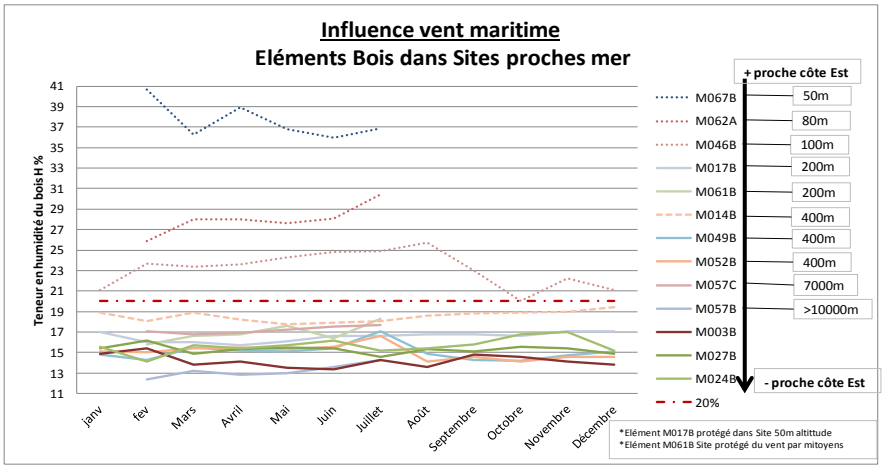


Fig. 3: Teneur en eau de bois mesurée pour des sites proches de la mer (Quistin 2018)

Conclusions et perspectives

Les approches expérimentales sur site et les calculs basés sur les données environnementales sur site ou issues de la base de données *MF* ont fourni de nombreux résultats. La comparaison de ces résultats, la calibration des appareils de mesures, les travaux complémentaires explicités en partie ici, ont permis la construction d'une large base de données sur les niveaux et les variation de teneur en eau des bois en œuvre dans les constructions en Martinique ; en tenant compte de différents paramètres singuliers pouvant faire varier les résultats et conclusions. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour aboutir à une cartographie de l'île pour un classement en classe de service 2 et 3, ainsi que pour de prochaines études pour une meilleure intégration des bois tropicaux dans l'environnement normatif des Eurocodes et d'une manière plus générale pour l'intégration pertinente et quantifiée dans des structure du GC.

Remerciements

Ce travail est soutenu et financé par le PACTEpar le biais du projet N° PACTE AP11-17-090. Une partie de ce travail est baséesur les données de Météo France. Les reconnaissances d'essences ont été effectuées par le CIRAD Montpellier (UR BioWooEB).

Références

Eurocode 5 (2005) CEN TC 250 SC5, NF EN 1995-1-1.Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois, part. 1-1 : généralités, règles communes et règles pour les bâtiments, 141 p.

Eurocode 5/NA (2010) AFNOR,NF EN 1995-1-1/NA.Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois, part. 1-1 : généralités, règles communes et règles pour les bâtiments, Annexe nationale à la NF EN1995-1-1:2005, 10 p.

Lamadon T. (2017) Taux d'humidité et panneaux dérivés en service, Note de cadrage-Bois Duramhen 971, 5 p.

Peterson C.(2008) Hand Held Moisture Meters. Symposium Report, Fort Lauderlale, 19 p.

Pipet JB. (2018), Mémoire Projet Bois Duramhen 972 Étude de l'humidité du bois en œuvre dans son environnement. Application et expérimentation dans la Région Martinique 972-Polytech 08/2018

Quistin P., Fournely E., Cador L., Romana L., Lamadon T., Gril J. (2017) Bois Duramhen 972 - durabilité, aménagement, humidité, environnement, 6èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Nantes, 21-23.11.17.

Quistin P. (2017) Bois Duramhen 972–Protocole partie 1- Mesures humidité et Outil Numérique, Avril 2017, 22 p.

Quistin P., Fournely E., Godi G.,Cador L., Lamadon T., Romana L. (2018) –Protocole partie 2 -Caractérisation mécanique des EssencesEtuvage et Monitoring, 01/2018, 20 p.

Quistin P.,Fournely E., Cador L., Lamadon T., Romana L. (2018) Bois Duramhen - Cadre Méthodologique Général, 06/2018, 30 p.

Quistin P.,(2018) Rapport Technique N°3a Ind4-Etuvage et Identification Cirad, 08.18, 48p.

Quistin P.,Bourgade O., Fournely E., Godi G.,Romana L. (2018)Compte-rendu de réunion n°7Comité Technique Co Tech n°7 20 juillet 2018.

Quistin P.,Méthodologie-Analyse des Investigations CoTech n° 6 -15 03/2018.

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Laboratoire ou organisme; ville (pays)	email
Ahmad ALKADRI	LMGC; Montpellier	ahmad.alkadri@umontpellier.fr
Charlotte ALLEMAND	Navier; Champs-s-M	c.allemand@hotmail.fr
Tancrède ALMÉRAS	LMGC; Montpellier	tancrede.almeras@umontpellier.fr
Jérôme ALTEYRAC	LabECAM; Lyon	jerome.alteyrac@ecam.fr
Togbé-Armel AMADJI	Biowooeb; Montpellier	amadjitarmel@gmail.com
Kodzo Vioto Abraham AMOUZOU	ESB; Nantes	kodzo.amouzou@ecoledubois.fr
Maxence ARNOULD	Silva; Nancy	maxence.arnould@agroparistech.fr
Olivier ARNOULD	LMGC; Montpellier	olivier.arnould@umontpellier.fr
Maxime AUDEBERT	LTDS; St-Etienne	maxime.audebert@enise.fr
Eric BADEL	Piaf; Clermont-Fd	eric.badel@inra.fr
Sandrine BARDET	LMGC; Montpellier	sandrine.bardet@umontpellier.fr
Jean-Baptiste BARRÉ	LESSEM; Grenoble	jean-baptiste.barre@irstea.fr
Jacques BEAUCHÊNE	Ecofog; Kourou (GF)	jacques.beauchene@cirad.fr
Walter Fiacre BEDOUNGUINDZI	Lermab; Vandoeuvre	walter-fiacre.bedounguindzi@univ-lorraine.fr
Christophe BELLONCLE	ESB; Nantes	christophe.belloncle@ecoledubois.fr
Thibault BENISTAND	Lermab; Epinal	thibault.benistand@univ-lorraine.fr
Antoine BÉREYZIAT	LTDS; St-Etienne	antoine.bereyziat@enise.fr
Benoît BESSEAU	Labomap; Cluny	benoit.besseau@ensam.eu
Arsène BIKORO BI ATHOMO	Iprem; Pau	arsenebikoro@yahoo.fr
Philippe BLANCHARD	ESB; Nantes	philippe.blanchard@ecoledubois.fr
Laurent BLÉRON	Lermab; Epinal	laurent.bleron@univ-lorraine.fr
Febrina BOER	Biowooeb; Montpellier	febrina.boer@outlook.com
Christ Stone Arnaud BOPENGA BOPENGA	Lermab; Vandoeuvre	christ-stone-arnaud.bopenga-bopenga@univ-lorraine.fr
Clément BOUDAUD	ESB; Nantes	clement.boudaud@ecoledubois.fr
Franck BOURRIER	LESSEM; Grenoble	franck.bourrier@irstea.fr
Loïc BRANCHERIAU	Biowooeb; Montpellier	loic.brancheriau@cirad.fr
Iris BRÉMAUD	LMGC; Montpellier	iris.bremaud@umontpellier.fr
Julia BUCHNER	ESB; Nantes	julia.buchner@ecoledubois.fr
Agnès BURGERS	LMGC; Montpellier	agnes.burgers@mines-ales.org
Jean-Claude BUTAUD	Labomap; Cluny	jean-claude.butaud@ensam.eu

Kévin CANDELIER	Biowooeb; Montpellier	kevin.candelier@cirad.fr
Sabine CARÉ	Navier; Champs-s-M	sabine.care@ifsttar.fr
Capucine CARLIER	LMGC; Montpellier	capucinecarlier@hotmail.com
Laurent CASTETS	Gascogne Bois; Bordeaux	lcastets@gascognebois.com
Brigitte CHABBERT	Fare; Reims	brigitte.chabbert@inra.fr
Gilles CHAIX	Agap; Piracicaba (BR)	gilles.chaix@cirad.fr
Myriam CHAPLAIN	I2M; Bordeaux	myriam.chaplain@u-bordeaux.fr
Hubert CHAPUIS	Lermab; Vandoeuvre	hubert.chapuis@univ-lorraine.fr
Pascal CHAROY	Le Bois International	pascal.charoy@orange.fr
Anne CHARRIER	CINaM; Marseille	charrier@cinam.univ-mrs.fr
Bertrand CHARRIER	Iprem; Pau	bertrand.charrier@univ-pau.fr
Fatima CHARRIER EL BOUHTOURY	Iprem; Pau	fatima.charrier@univ-pau.fr
Zhou CHEN	FCBA; Champs-s-M	zhou.chen@fcba.fr
Sarah CHEPKWONY	Lermab; Vandoeuvre	sarah.chepkwony@univ-lorraine.fr
Bruno CLAIR	LMGC; Montpellier	bruno.clair@cnrs.fr
Francis COLIN	Silva; Nancy	francis.colin@inra.fr
Julien COLIN	LGPM; Chatenay	julien.colin@ecp.fr
Robert COLLET	Labomap; Cluny	robert.collet@ensam.eu
Thiéry CONSTANT	Silva; Nancy	thiery.constant@inra.fr
Guy COSTA	LCSN; Limoges	guy.costa@unilim.fr
Jean-Luc COUREAU	I2M; Bordeaux	jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr
vivien CROS	LESSEM; Grenoble	vivien.cros@irstea.fr
Rémi CURTI	Labomap; Cluny	Remi.curti@ensam.eu
Francis BIGOT DE MOROGUES	FCBA; Grenoble	Francis.de.morogues@fcba.fr
Annabelle DÉJARDIN	AGPF; Orléans	annabelle.dejardin@inra.fr
Jean-Luc DELPEUCH	ComCom Clunisois; Cluny	
Louis DENAUD	Labomap; Cluny	louis.denaud@ensam.eu
Malick DIAKHATE	IRDL; Brest	malick.diakhate@univ-brest.fr
Jana DLOUHA	Silva; Nancy	jana.dlouha@inra.fr
Dao DOUGABKA	Biowooeb; Montpellier	dougabkadao@yahoo.fr
Patricia ROEKEL-DREVET	Piaf; Clermont-Fd	patricia.drevet@uca.fr
Anthony DUFOUR	LRGP; Nancy	Anthony.Dufour@univ-lorraine.fr
Stéphane DUMARÇAY	Lermab; Vandoeuvre	stephane.dumarcay@univ-lorraine.fr
Anna DUPLEIX	LMGC; Montpellier	anna.dupleix@riseup.net

Sébastien DURIF	Pascal; Clermont-Fd	sebastien.durif@uca.fr
Serge EKOMY ANGO	IRT; Libreville (GA)	ekomyango@yahoo.fr
Soliman EL KABIR	GC2D; Egletons	soliman.elkabir@yahoo.fr
Starlin Peguy ENGOZOGHO ANRIS	Iprem; Pau	anrispeguy@yahoo.fr
Frédéric EPAUD	Citeres; Tours	frederic.epaud@univ-tours.fr
Florent EYMA	ICA; Toulouse	florent.eyma@iut-tarbes.fr
Patrick FONTI	WSL; Birmensdorf (CH)	patrick.fonti@wsl.ch
Eric FOURNELY	Pascal; Clermont-Fd	eric.fournely@uca.fr
Meriem FOURNIER	Silva; Nancy	meriem.fournier@agroparistech.fr
Manon FRANCES	Iprem; Pau	manon.mg.frances@gmail.com
Rémy FRAYSSINHES	Labomap; Cluny	remy.frayssinhes@ensam.eu
Jean-Marie GAILLARD	FCBA; Bordeaux	Jean-Marie.GAILLARD@fcba.fr
Matthieux GALLLIOU	ESB; Nantes	mathieu.galliou@etu.ecoledubois.fr
Eric GELHAYE	IAM; Nancy	eric.gelhaye@univ-lorraine.fr
Jean GÉRARD	Biowooeb; Montpellier	jean.gerard@cirad.fr
Christine GÉRARDIN	Lermab; Vandoeuvre	Christine.Gerardin@univ-lorraine.fr
Philippe GÉRARDIN	Lermab; Vandoeuvre	philippe.gerardin@univ-lorraine.fr
Nihal GHANEM	Navier; Champs-s-M	nihale.gh@hotmail.com
François GIBIER	LMGC; Montpellier	francois.gibier@umontpellier.fr
Stéphane GIRARDON	Labomap; Cluny	Stephane.Girardon@ensam.eu
Giacomo GOLI	Gesaaf; Florence (IT)	giacomo.goli@unifi.it
Cécile GRAZIDE	LMC2; Lyon	cecile.grazide@univ-lyon1.fr
Joseph GRIL	Pascal; Clermont-Fd	joseph.gril@cnrs.fr
Romain GUÉLOU	ICA; Toulouse	romain.guelou@iut-tarbes.fr
Daniel GUIBAL	Biowooeb; Montpellier	daniel.guibal@cirad.fr
Alban GUYOT	Biowooeb; Montpellier	alban.guyot@cirad.fr
Wael HAFSA	GC2D; Egletons	wael.hafsa@unilim.fr
Seif-Eddine HAMDI	I2M; Bordeaux	seif3eddine@yahoo.com
Stéphane HAMEURY	CSTB; Marne-la-Vallée	Stephane.HAMEURY@cstb.fr
Jean-Marc HENIN	SPW; Gembloux (BE)	jeanmarc.henin@spw.wallonie.be
Annabelle HOSPITAL	Lermab; Epinal	annabelle.hospital@univ-lorraine.fr

Louise HOVASSE	Selmer; Mantes-la-V	lhovasse@selmer.fr
Hsien-Tsung HU	LMGC; Montpellier	tudaer@gmail.com
Samuel IKOGOU	MSB; Libreville (GA)	ikogousamuel@yahoo.fr
Hamed ISSAOUI	Iprem; Pau	hamed.issaoui@univ-pau.fr
Amine JAMAAOUI	ICA; Toulouse	amine.jamaaoui@hotmail.com
Michael JOUSSERAND	Buffet Crampon; Mantes-la-V	michael.jousserand@buffetcrampon.com
Delphine JULLIEN	LMGC; Montpellier	Delphine.Jullien@umontpellier.fr
Thierry LAMANDON	Veritas; Paris	thierry.lamadon@fr.bureauveritas.com
Francesca LANATA	ESB; Nantes	francesca.lanata@ecoledubois.fr
Pierre LARRICQ	ICA; Toulouse	pierre.larricq@iut-tarbes.fr
Anne LAVALETTE	Panibois; Orléans	anne.lavalette@panibois.com
Louise LE BARBENCHON	I2M; Bordeaux	louise.le_barbenchon@ensam.eu
Arthur LEBÉE	Navier; Champs-s-M	arthur.lebee@enpc.fr
Romain LEMAÎTRE	Lermab; Epinal	romain.lemaitre@univ-lorraine.fr
Jonathan LENGLET	Silva; Nancy	jonathan.lenglet@agroparistech.fr
Aude LEREU	Fresnel; Marseille	aude.lereu@fresnel.fr
Léo LEROYER	Iprem; Pau	leo.leroyer@univ-pau.fr
Philippe LORONG	PIMM; Paris	philippe.lorong@ensam.eu
Sylvain LOTTE	Biowooeb; Montpellier	sylvain.lotte@cirad.fr
Saint Bickolard MABICKA IWANGOU	Lermab; Epinal	saintbickolard@yahoo.fr
Hubert MAIGRE	Lamcos; Lyon	hubert.maigre@insa-lyon.fr
Koliann MAM	Navier; Champs-s-M	koliann.mam@enpc.fr
Germice Jordy MAMBILI LEBONGUI	Pascal; Clermont-Fd	jordymambili95@gmail.com
Rémy MARCHAL	Biowooeb; Montpellier	remy.marchal@cirad.fr
Bertrand MARCON	Labomap; Cluny	Bertrand.marcon@ensam.eu
Benjamin MARIOTON	ONF; Cluny	benjamin.marioton@onf.fr
Corinne MARTIN	Silva; Nancy	corinne.martin@agroparistech.fr
Eric MASSON	Cribois; Epinal	eric.masson@cribois.net
Sylvain Mathieu	Conseil Régional BFC	
Emmanuel MAURIN	CRC; Champs-s-M	emmanuel.maurin@culture.gouv.fr
Jérémy MEHATS	LCPO; Bordeaux	jeremy.mehats@gmail.com
Téhophile MEHINTO	Ecofog; Kourou (GF)	theophile.mehinto@guyane.univ-ag.fr
Franck MICHAUD	ESB; Nantes	franck.michaud@ecoledubois.fr
Cédric MONTERO	LMGC; Montpellier	cedric.montero@umontpellier.fr
Stéphane MOREL	I2M; Bordeaux	stephane.morel@u-bordeaux.fr

MOUTEMBE	IRDL; Brest	bienvenumoutembe@gmail.com
Rostand MOUTOU PITTI	Pascal; Clermont-Fd	rostand.moutou_pitti@uca.fr
Shu-Wah MUI	LMGC; Montpellier	muishuwah@gmail.com
Muhammad Tanveer MUNIR	ESB; Nantes	tanveer.munir@ecoledubois.fr
Lionel MUYTJENS	GxABT; Gembloux (BE)	lionel.muytjens@outlook.com
Loïc MUZY	ComCom Clunisois; Cluny	charte-forestiere@enclunisois.com
Dang Mao NGUYEN	Navier; Champs-s-M	dang-mao.nguyen@enpc.fr
Sébastien NGWA OBAME	Lermab; Vandoeuvre	sebastien.ngwa-obame@univ-lorraine.fr
Benjamin NIEZ	Piaf; Clermont-Fd	benjamin.niez@live.fr
Aubin NORMAND	CINaM; Marseille	aubin.nor@gmail.com
Djilali OUAAR	Biowooeb; Montpellier	salimdjillali@yahoo.fr
Oussamah OUALI	FCBA; Bordeaux	oussemah.ouali@fcba.fr
Claude Feldman PAMBOU NZIENGUI	Pascal; Clermont-Fd	claude_feldman.pambou_nziengui@etu.uca.fr
Cédric PEREZ	I2M; Bordeaux	cedric.perez@u-bordeaux.fr
Marianne PERRIN	ICA; Toulouse	marianne.perrin@iut-tarbes.fr
Minh Dung PHAM	GC2D; Egletons	pmdung1701@gmail.com
Jean-Baptiste PICHANCOURT	Silva; Nancy	jean-baptiste.pichancourt@inra.fr
Isabelle PIERREJEAN	Ecofog; Kourou (GF)	isabelle.pierrejean@univ-guyane.fr
Gilles PILATE	AGPF; Orléans	gilles.pilate@inra.fr
Jean-Baptiste PIPET	Anco; Guadeloupe	jb.pipet@gmail.com
Mariana PIRES FRANCO	Agap; Piracicaba (BR)	ma.pires@hotmail.com
Octavian POP	GC2D; Egletons	ion-octavian.pop@unilim.fr
Guillaume POT	Labomap; Cluny	guillaume.pot@ensam.eu
Jonathan PRUNIER	Ecofog; Kourou (GF)	Jonathan.Prunier@ecofog.gf
Citra PURBA	Silva; Nancy	citra-yanto-ciki.purba@inra.fr
Paul QUISTIN	Anco; Guadeloupe	pquistin@anco971.fr
Tahiana RAMANANANTOANDRO	ESSA; Tananarive (MG)	ramananantoandro@gmail.com
Andriambelo Radonirina RAZAFIMAHATRATRA	Agap; Antananarivo (MG)	antenainariella@gmail.com
Ravo Nantenaina Gabriella RAZAFINARIVO	Agap; Antananarivo (MG)	andriambelo.radonirina@gmail.com
Nadège REBOUL	LMC2; Lyon	nadege.reboul@univ-lyon1.fr
Romain RÉMOND	Lermab; Epinal	romain.remond@univ-lorraine.fr

Amanda RIBAS LEÃO	ESB; Nantes	amanda.ribasleao@etu.ecoledubois.fr
Lorenzo RIPARBELLI	Gesaaf; Florence (IT)	lorenzo.riparbelli@unifi.it
Leila ROSTOM	Navier; Champs-s-M	leila.rostom@enpc.fr
Frédéric ROUGER	FCBA; Champs-s-M	frederic.rouger@fcba.fr
Claire ROUSSEY	LGPM; CentParis	claire.roussey@centralesupelec.fr
Benjamin ROUX	LaBoMap; Cluny	benjamin.roux@ensam.eu
Julien RUELLE	Silva; Nancy	julien.ruelle@inra.fr
Julien SAUVAGÈRE	FCBA; Bordeaux	julien.sauvagere@fcba.fr
Nicolas SAUVAT	GC2D; Egletons	nicolas.sauvat@unilim.fr
Juliette TAIEB	ArScAn; Paris	juliette.taieb@noos.fr
Mokhfi TAKARLI	GC2D; Egletons	mokhfi.takarli@unilim.fr
Marie-France THÉVENON	Biowooeb; Montpellier	marie-france.thevenon@cirad.fr
Bernard THIBAUT	LMGC; Montpellier	bernard.thibaut@umontpellier.fr
Evelyne TOUSSAINT	Pascal; Clermont-Fd	Evelyne.Toussaint@uca.fr
Rosilani TRIANOSKI	UFPR; Curitiba (BR)	rosilani@ufpr.br
Placide UWIZEYIMANA	ICA; Toulouse	Placide.uwizeyimana@iut-tarbes.fr
Dominique VARICHON	CEGF; St-Dié-des-Vosges	foret.expert@gmail.com
Maximin VARNIER	GC2D; Egletons	maximin.varnier92@gmail.com
Guillermo VELEZ	ESB; Nantes	guillermo.velez@ecoledubois.fr
Clémentine VEROVE	Lermab; Vandoeuvre	clementine.verove@univ-lorraine.fr
Marcia VIDAL	LabECAM; Lyon	marcia.vidal@ecam.fr
Joffrey VIGUIER	Labomap; Cluny	Joffrey.viguier@ensam.eu
Marc VINCENT	Xylofutur; Bordeaux	marc.vincent@xylofutur.fr
Cherryl Mirabelle ZANG ONDO	Lermab; Vandoeuvre	cherryl-mirabelle.zang-ondo@univ-lorraine.fr
Xi ZHANG	GC2D; Egletons	luciezhang@outlook.com