HAL
open science

Actes des 9èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois

Yannick Sieffert, Alix Hubert, Ivan Mazel, Joseph Gril

To cite this version:

Yannick Sieffert, Alix Hubert, Ivan Mazel, Joseph Gril (Dir.). Actes des 9èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois : Multifonctionnalité des forêts et diversité des usages du bois. 9, pp.220, 2020, Journées Annuelles du GDR3544 Sciences du Bois. hal-03106568

HAL Id: hal-03106568

https://hal.science/hal-03106568

Submitted on 11 Jan 2021

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

MINISTÈRE
DE LA CULTURE
Liberté
Égalité
Fraternité

Actes des 9èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 SCIENCES DU BOIS

Multifonctionnalité des forêts & diversité des usages du bois

18-19 & 20 NOVEMBRE 2020

Université Grenoble Alpes

Grenoble, France

Manifestation : 9èmes journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois, Grenoble, Nov. 2020

Collection : Journées annuelles du GDR 3544 sciences du bois, Volume 9, 2020

Coordination et édition des actes : Yannick Sieffert (3SR), Alix Hubert (CRAterre), Ivan Mazel (AE&CC), Joseph Gril (Institut Pascal et PIAF)

SOMMAIRE

Editorial p. 3

Comité d'organisation et comité scientifique p. 4

Soutiens et sponsors p. 5

Programme p. 6

Groupes de travail et atelier p. 7

Présentations orales invitées p. 8

Session Posters A p. 14

Session Posters B p. 76

Session Posters C p. 141

Poster non présenté p. 212

Liste des participants . p. 217

Editorial

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 de structurer la recherche sur le bois en France pour lui donner une visibilité nationale, de contribuer au développement de la formation en sciences du bois et de servir de relai aux réseaux internationaux de sciences du bois. Afin de répondre à ces objectifs, un évènement scientifique est organisé annuellement sur 3 jours. Il doit permettre de partager une culture commune, de promouvoir les travaux des laboratoires membres du GDR Bois, d'échanger sur des enjeux transversaux (relations internationales, formation, partage des ressources). Les 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, nous souhaitons que 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 **9èmes journées annuelles du GDR Bois** devaient être organisées à Grenoble, sur le campus de l'Université, du 18 au 20 novembre 2020, hébergées par le laboratoire 3SR. Malgré la crise sanitaire, il a été décidé de les maintenir aux dates prévues, en adaptant l'organisation aux contraintes imposées sur le moment par le gouvernement. Du fait du confinement, le mixte présentiel/distanciel n'était plus envisageable et nous avons donc opté pour une formule 100% à distance. Les sessions plénières ont été organisées sous forme de webinar sur Livestorm (plateforme disponible à INRAE) et les groupes de travail sous forme de visios classiques sous BBCollab (https://eu.bbcollab.com). Outre 3SR, plusieurs laboratoires et institutions du site ont contribué par le biais d'une aide à l'organisation et/ou d'interventions invitées Cermav, FCBA, AE&CC à l'Ensag, Arc-Nucleart au CEA, Lessem et Etna de l'INRAE. Le programme a été élaboré de manière à coller au plus près des différents volets habituellement proposés en présentiel lors des précédentes éditions. Il était donc construit sur trois journées complètes et comprenait 9 exposés invités, dont 8 d'intervenants Grenoblois, 52 posters introduits par des exposés éclairs puis discutés en plénière (et dont certains ont été primés par vote en ligne sur https://www.balotilo.org/), 8 réunions de groupe de travail et 1 atelier sur la microtomographie à rayons X. Certaines visites techniques ont pu être remplacées par des visites virtuelles qui avaient été préparées spécialement pour l'évènement. Un total de 213 personnes, dont 26 de 17 pays, et 50 déclarés comme étudiants, ont participé aux sessions plénières, avec une participation variant de 120 à 150 selon les sessions, et typiquement 20-25 personnes à chacune des 8 réunions de groupe de travail ou atelier. L'absence des nombreux échanges informels suscités en présentiel par ce type d'événement a ainsi été partiellement compensée par une participation plus importante et plus constante sur l'ensemble de l'évènement que d'habitude, notamment depuis l'étranger. Les actes de ces journées rassemblent les résumés des conférenciers invités (exposés) et ceux des contributions volontaires (posters), ces derniers ayant été vérifiés par un comité de lecture. 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 Bois.

Merci à tous ceux qui se sont mobilisés pour organiser cette manifestation et en garantir le succès malgré les conditions difficiles du moment.

Joseph GRIL, Directeur du GDR3544 Sciences du bois
Eric Badel, Directeur Ajoint
Myriam Chaplain, Directrice Ajointe

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**

Comité d'organisation et comité scientifique

Comité d'organisation

Coordinateur : Yannick Sieffert

- Eric BADEL, INRAE, PIAF Clermont-Fd / GDR Bois
- Franck BOURRIER, INRAE, ETNA, Grenoble
- Frédéric BERGER, INRAE, LESSEM, Grenoble
- Myriam CHAPLAIN, UB, I2M Bordeaux / GDR Bois
- Bruno CLAIR, CNRS, LMGC Montpellier / GDR Bois
- Jérémy GRANGE, DGD Développement international et territorial, UGA
- Anne-Karine FROMENT, CEA, Arc Nucleart, Grenoble
- Joseph GRIL, CNRS, Institut Pascal et PIAF Clermont-Fd / GDR Bois
- Stéphane GRULOIS, FCBA Grenoble
- Alix HUBERT (prestataire), CRAterre Grenoble
- Thierry JOFFROY, UGA, AE&CC, ENSAG,
- Corinne MARTIN, AgroParisTech, SILVA Nancy / GDR Bois
- Nathalie MARLIN, UGA, LGP2, INP Grenoble
- Ivan MAZEL (post-doctorant), UGA AE&CC, ENSA Grenoble
- Yoshiharu NISHIYAMA, CNRS, CERMAV Grenoble
- Michel PETIT-CONIL, FCBA Grenoble
- François PORTIER, CERMAV Grenoble
- Yannick SIEFFERT, UGA, 3SR Grenoble
- David SOARES (doctorant) AE&CC, ENSA Grenoble
- Florent VIEUX-CHAMPAGNE, UGA, 3SR Grenoble
- Santosh YADAV (doctorant), UGA, 3SR Grenoble

Comité scientifique

Le comité scientifique des journées est constitué du Comité de Pilotage du GDR3544 « Sciences du bois » et d'organisateurs des journées 2020.

- Christophe BELLONCLE, ESB Nantes
- Eric BADEL, PIAF, INRAE Clermont-Ferrand
- Laurent BLÉRON, LERMaB, ENSTIB Épinal
- Guy COSTA, Pereine/chaire Sylvalim Limoges
- Bertrand CHARRIER, IPREM Pau
- Myriam CHAPLAIN, I2M Bordeaux
- Bruno CLAIR, LMGC Montpellier
- Thiery CONSTANT, Silva Nancy
- Louis DENAUD, Labomap Cluny
- Eric FOURNELY, Inst. Pascal Clermont-Fd
- Philippe GÉRARDIN, LERMaB Nancy
- Stéphane GRELIER, LCPO Bordeaux
- Joseph GRIL, Inst. Pascal Clermont-Fd
- Rémy MARCHAL, ENSAM Cluny
- Corinne MARTIN, Silva Nancy
- Emmanuel MAURIN, LRMH Champs-sur-Marne
- Frédéric ROUGER, FCBA Bordeaux
- Nicolas SAUVAT, GC2D Egletons
- Yannick SIEFFERT, 3SR Grenoble
- Isabelle THÉRY-PARISOT, CEPAM Nice
- Marie-France THÉVENON, BioWooEB Montpellier
- Stéphane VAIEDELICH, LRRMM Paris

soutiens et sponsors

Soutiens et sponsors

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

PROGRAMME

Programme des journées annuelles du GDR Bois

/ 100% Distanciel

MERCREDI 18 NOVEMBRE 2020

09:15 - 09:30	ACCUEIL	Ouverture de la plateforme	
09:30 - 10:00	OUVERTURE	Mot de bienvenue	*Direction du GDR Bois*
10:00 - 10:30	CONFÉRENCE	Visite du chantier du plus haut immeuble de logements en bois de France.	*Jacques FELIX FAURE*
10:30	PAUSE		
11:00 - 11:30	CONFÉRENCE	Archéologie, Histoire : ARC-Nucléart conserve et restaure les bois et d'autres matériaux organiques...	*Karine FROMENT*
11:30 - 12:00	CONFÉRENCE	Le projet HaDEcoT-Bois - Habitat et développement économique des territoires de la Région Auvergne-Rhône-Alpes : le cas de la filière bois de construction."	*Thierry JOFFROY*
12:00	PAUSE DÉJEUNER		
13:00 - 14:00	POSTERS	*SESSION A / Présentations éclairs*	
14:00 - 15:30	POSTERS	*SESSION A / Echanges*	
15:30	PAUSE		
16:00 - 18:00	GROUPE DE TRAVAIL	Retrouvez la liste des GT, horaires, responsables et liens de connexion ci-dessous	
18:00 - 19:00	RÉUNION COPIL	Réservée aux membres du comité de pilotage du GDR Sciences du Bois	

JEUDI 19 NOVEMBRE 2020

09:00 - 09:30	CONFÉRENCE	Structure des parois des cellules du bois sondées par diffusion des neutrons et des rayons X.	*Yoshiharu NISHIYAMA*
09:30 - 10:00	CONFÉRENCE	Quel avenir pour la chimie du bois ?	*Dominique LACHENAL*
10:00 - 10:30	CONFÉRENCE	Les papiers en tant que matériaux biosourcés multi-échelles : de la conception de microstructure aux matériaux composés.	*Jean-Francis BLOCH*
10:30	PAUSE		
11:00 - 12:00	POSTERS	*SESSION B / Présentations éclairs*	
12:00	PAUSE DÉJEUNER		
13:00 - 14:30	POSTERS	*SESSION B / Echanges*	
14:30 - 15:00	CONFÉRENCE	Architecture Bois de montagne.	*Jean-François LYON CAEN*
15:00 - 15:30	CONFÉRENCE	Etude sur les pratiques locales de préservation du bois de construction.	*Vincent TRABAUD*
15:30	PAUSE		
16:00 - 18:00	GROUPE DE TRAVAIL	Retrouvez la liste des GT, horaires, responsables et liens de connexion ci-dessous	

VENDREDI 20 NOVEMBRE 2020

09:00 - 09:30	CONFÉRENCE	Le rôle du bois dans l'économie urbaine mondiale.	*Jean-Marc RODA*
09:30 - 10:30	POSTERS	*SESSION C / Présentations éclairs*	
10:30 - 12:00	POSTERS	*SESSION C / Echanges*	
12:00	PAUSE DÉJEUNER		
13:00 - 14:00	CONCLUSION	*Prix posters et mots de conclusion*	*La direction du GDR Bois*
14:00 - 15:00	RÉUNION	Réunion des représentants des laboratoires	

groupes de travail et atelier

Groupes de travail & atelier / 100% Distanciel

GROUPES DE TRAVAIL

Huit Groupes de Travail (GT) ont été proposés pour cette 9ème édition des journées annuelles du GDR Bois, selon la liste définie ci-dessous. Ils ont été répartis sur deux créneaux prévus le 1er et 2ème jour.

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.

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 (*), les comptes rendus des réunions sont disponibles à : http://www6.inra.fr/gdr-sciences-du-bois/Groupes-de-travail

LISTE DES GT :

- RUPTURE DU BOIS	Myriam CHAPLAIN , Frédéric DUBOIS, Rostand MOUTOU PITTI
- USINAGE DU BOIS	Florent EYMA et Louis DENAUD
- SCIENCES ET ARTISANAT DU BOIS	Iris BREMAUD
- FORMATION BOIS	Kévin CANDELIER et Rémy MARCHAL
- IMAGERIE DU BOIS	Evelyne TOUSSAINT et Guy COSTA
- XYLOMAT	Bertrand CHARRIER
- CONSTRUCTION BOIS	Nicolas SAUVAT, Eric FOURNELY, Yannick SIEFFERT, Ivan MAZEL, David RODRIGUES-SOARES
- PATRIMOINE BOIS	Delphine JULLIEN-PIERRE et Emmanuel MAURIN

ATELIER TOMOGRAPHIE

Un atelier tomographie intitulé " La tomographie au service de la mécanique des matériaux. Principes de la méthode et outils développés au 3SR." a été proposé en parallèle du 2ème créneau. Il a été assuré par Edward ANDO et Nicolas LENOIR (3SR, UGA Grenoble)

Présentations orales invitées

Session introductive - Mercredi 18 novembre

Visite du chantier du plus haut immeuble de logements en bois de France

Jacques Félix-Faure (ENSAG-AE&CC Grenoble)

Archéologie, Histoire : ARC-Nucléart conserve et restaure les bois et d'autres matériaux organiques …

Karine Froment (ARC-Nucléart Grenoble)

Le projet HaDEcoT-Bois - Habitat et développement économique des territoires de la Région Auvergne-Rhône-Alpes : le cas de la filière bois de construction

Thierry Joffroy (ENSAG-AE&CC Grenoble)

Session 1 - Jeudi 19 novembre

Structure des parois des cellules du bois sondées par diffusion des neutrons et des rayons X

Yoshiharu Nishiyama (CERMaV Grenoble)

Quel avenir pour la chimie du bois ?

Dominique Lachenal (LGP2 Grenoble)

Les papiers en tant que matériaux biosourcés multi-échelles : de la conception de microstructure aux matériaux composés

Jean-Francis Bloch (3SR Grenoble)

Session 2 - Jeudi 19 novembre

Architecture, bois et montagne

Jean-François Lyon-Caen (ENSAG Grenoble)

Etude sur les pratiques locales de préservation du bois de construction

Vincent Trabaud (ENSAG-AE&CC Grenoble)

Session 3 - Vendredi 20 novembre

Le rôle du matériau bois dans l'économie urbaine mondiale

Jean-Marc Roda (CIRAD-F&S, Malaisie)

Présentations orales invitées

Mercredi 18 novembre > 10:00-10:30

JACQUES FELIX-FAURE

Visite du chantier du plus haut immeuble de logements en bois de France.

Ambition du projet du Haut-Bois et caractéristiques principales :
Actis est le premier bailleur au niveau national à réaliser un bâtiment de logements sociaux de 9 niveaux en structure bois. Le projet porte 3 enjeux prioritaires, un enjeu architectural : construire une résidence en bois, de 9 niveaux sur une zone de risque sismique 4/5, dans une ZAC Flaubert de Grenoble ambitieuse en termes d'aménagement et de construction durable ; un enjeu environnemental : l'utilisation de matériaux biosourcés pour un bâtiment passif ; un enjeu social : celui d'avoir toujours en tête l'usage et l'appropriation par les locataires qui viendront habiter les logements. Ce projet se veut innovant, démonstrateur de la construction du futur et à ce titre bien sûr reproductible.

Jacques Félix-Faure ; Architecte et Ingénieur diplômé de l'Ecole Nationale des Arts et Industries de Strasbourg, et responsable du Master Architecture-Paysage- Montagne-Territoire d'Inventions à l'ENSAG. En 2004, il crée l'Atelier 17C à Barraux en Isère avec 3 principaux axes de conception: Montagne et Paysage / Participation, concertation et implication des futurs occupants / Economie globale et architecture.

Mercredi 18 novembre > 11:00-11:30

KARINE FROMENT

Archéologie, Histoire : ARC-Nucléart conserve et restaure les bois et d'autres matériaux organiques…

Cette visite un peu particulière d'ARC-Nucléart vous amènera à découvrir ses installations de conservation d'objets archéologiques en bois, cuirs, fibres végétales gorgées d'eau, ou de sculptures en bois polychromé : Irradiateur gamma, Bassins d'imprégnation, lyophilisateurs. Un petit tour en atelier fera découvrir le travail de nos restaurateurs, permettant aux objets consolidés d'être ensuite restaurés, pour pouvoir de nouveau les exposer dans les musées.

Karine Froment, Ingénieure ENSCP, docteur et HDR, est Directrice d'ARC-Nucléart depuis 5 ans. Auparavant, elle a été chercheuse dans différents domaines au CEA : combustible nucléaire, sûreté nucléaire, puis Conversion énergétique de la biomasse.

Présentations orales invitées

Mercredi 18 novembre > 11:30-12:00

THIERRY JOFFROY

Le projet HaDEcoT-Bois - Habitat et développement économique des territoires de la Région Auvergne-Rhône-Alpes : le cas de la filière bois de construction.

Le projet HaDEcoT-Bois est financé par la région Auvergne Rhône Alpes. Son objectif est de faire évoluer les connaissances vers un meilleure utilisation du bois local en construction dans une perspective de contribution au développement économique et à la création d'emploi qualifiés dans la région.
Porté par l'équipe CRAterre de l'unité de recherche AE&CC de l'ENSAG et le laboratoire 3SR, il rassemble, sous couvert de l'Université Grenoble Alpes (UGA), un large partenariat avec des représentants du secteur public et privé et des institutions spécialisées dont certaines opèrent déjà depuis de nombreuses années sur le sujet. Les recherches (1 thèse et un post doc essentiellement) portent sur trois zones d'étude prioritaires, mais explorent aussi des références spécifiques en France et en Europe.

Thierry Joffroy est architecte, chercheur à l'ENSAG, habilité à la direction de recherche (HDR). Il est actuellement Directeur de l'équipe CRAterre de l'Unité de recherche AE&CC à l'ENSAG (membre de UGA) et est le responsable scientifique principal du projet HaDEcoT-Bois.

Jeudi 19 novembre > 09:00-09:30

YOSHIHARU NISHIYAMA

Structure des parois des cellules du bois sondées par diffusion des neutrons et des rayons X.

Les parois des cellules du bois sont des nano-composites de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. L'organisation intime de ces trois constituants, qui résulte d'un processus biologique itératif, est à l'origine à la fois du transfert de charge efficace et de la récalcitrance (ou résistance) tant chimique que biologique. L'ILL et le synchrotron fournissent des neutrons et des photons de longueur d'onde sub-nanométrique qui permettent de sonder les structures des parois à différentes échelles. D'autres capacités de ces grands instruments utiles pour la science du bois seront également présentées.

Yoshiharu Nishiyama, Directeur de recherche CNRS au CERMAV, équipe Structure et Propriété des Glycomatériaux, membre de Japan Wood Research Society, spécialiste en analyse structurale par diffusion des rayons-X et des neutrons.

Présentations orales invitées

DOMINIQUE LACHENAL

Jeudi 19 novembre > 09:30-10:00

Quel avenir pour la chimie du bois ?

La valorisation des constituants du bois (cellulose, hémicellulose, lignine, extractibles) en biocarburants, produits chimiques et matériaux fait l'objet d'une recherche intensive qui se traduit déjà aujourd'hui par des investissements industriels très importants. Ces innovations sont pour l'essentiel portés par l'industrie de la cellulose qui transforme ses unités de production en véritables bioraffineries.

Dominique Lachenal ; Professeur Emérite Grenoble INP ; Ancien directeur du Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers et de Grenoble INP Pagora ; Médaille d'or Académie d'Agriculture de France.

JEAN-FRANCIS BLOCH

Jeudi 19 novembre > 10:00-10:30

Les papiers en tant que matériaux biosourcés multi-échelles : de la conception de microstructure aux matériaux composés.

Nous nous concentrerons sur les structures fibreuses 3D (papiers) et leur relation avec les propriétés physiques finales utilisées, en tenant compte des multiples échelles des structures et des phénomènes. Nous illustrerons l'intérêt de la conception des micro et macro-structures de ces matériaux surprenants pour différentes applications.

A Grenoble INP, Jean-Francis Bloch a développé une expertise en physique du papier (multiphysique et multi-échelles), analyse structurelle, transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il est actuellement chercheur invité permanent à Harvard (G. Whitesides, États-Unis), professeur invité à Lodz T.U. (Pologne), Guangzhou T.U. (Chine), Darmstadt T.U. (Allemagne) et professeur assistant à l'UQTR (Canada). Il est également le directeur général de BeFC.

Présentations orales invitées

JEAN-FRANÇOIS LYON CAEN

Jeudi 19 novembre > 14:30-15:00

Architecture, bois et montagne.

Nous prendrons appuis sur l'évolution des constructions en bois en altitude et particulièrement les refuges ou cabanes de montagne pour évoquer l'évolution des techniques de construction adoptées pour réaliser des programmes exceptionnels mettant en œuvre chaque fois des processus à dimensions expérimentales qui peuvent éclairer les dispositifs plus courants adoptés de nos jours dans « l'architecture en bois ».

Jean-François Lyon-Caen, architecte dplg. , spécialiste de la construction en montagne. L'activité d'enseignant chercheur à l'école nationale supérieure d'architecture de Grenoble (fondateur du master architecture-paysage-montagne et de son équipe de recherche) le conduit à approfondir la nature des liens entre projets contemporains, prospectives et projets de valorisation des patrimoines, par des échanges réguliers à l'échelle du massif alpin. Responsable de nombreux travaux et publications sur l'architecture et l'urbanisme en montagne, il prépare la publication d'un ouvrage consacré à l'architecture des refuges dans les Alpes. Il conduit par ailleurs des réalisations urbanistiques et architecturales, aussi bien de projets de réhabilitation que des constructions nouvelles reposant sur la recherche d'un imaginaire contemporain adapté aux territoires de la montagne habitée et aux préoccupations liées à la transition environnementale.

VINCENT TRABAUD

Jeudi 19 novembre > 15:00-15:30

Etude sur les pratiques locales de préservation du bois de construction.

Dans toutes les régions du monde, les différentes cultures constructives ont su développer des savoir-faire en lien avec leur environnement pour répondre à la problématique de préservation du matériau bois. Mais que sait-on vraiment de ces pratiques ? Peu d'entre-elles sont documentées et les descriptions restent souvent vagues. Toutefois, celles-ci offrent de nombreuses pistes de recherche pour développer des solutions frugales en réponse aux questions environnementales et aux différents contextes économiques. Cette présentation expose un premier état de l'art et propose de premières pistes de valorisation de ces pratiques et de recherches.

Vincent Trabaud est architecte chercheur associé à l'unité de recherche AE&CC, et à Amàco.
Il s'intéresse depuis plusieurs années aux cultures constructives et à la pertinence de leur réinterprétation dans l'architecture contemporaine pour répondre aux différents défis actuels, par la mise en valeur des matériaux et des savoir-faire associés.

Présentations orales invitées

JEAN-MARC RODA

Vendredi 20 novembre > 09:00-09:30

Le rôle du bois dans l'économie urbaine mondiale.

De nos jours, la démographie, et plus précisément la démographie urbaine, est le moteur de la consommation de matière ligneuse à l'exception de l'Amérique du Nord et de l'Europe de l'Est (ancien bloc soviétique). Les modèles phénoménologiques de la demande de bois basés sur la démographie urbaine permettent des prévisions solides pour les régions émergentes et tropicales. Mais un examen plus approfondi des modes de consommation de matières, par pays, suggère trois autres facteurs: (1) les pays ne sont pas au même stade de développement; (2) les différences culturelles dans les modes de consommation sont fortes, en partie fondées sur l'accessibilité relative aux ressources matérielles; (3) les variations nationales de l'accès aux capitaux et des coûts de main-d'œuvre pour les PME impliquent différentes méthodes de construction et différentes préférences matérielles. Les modèles par pays semblent faire écho aux vues de J. E. Fernandez sur le métabolisme urbain et la consommation de matières. Les résultats impliquent que la demande française de bois n'augmenterait pas de manière notable sans un changement de culture ou une réorganisation du système de production forestier français. Ces résultats préliminaires doivent être confirmés et approfondis avant d'être généralisés.

Jean-Marc Roda est économiste au CIRAD et détaché à l'Université Putra Malaisie. Il est Directeur technique du centre d'excellence sur la valorisation de la biomasse de Malaisie. Il est également le coordinateur de la Malaisie pour la plate-forme de coopération internationale sur la «durabilité des paysages agricoles en Asie du Sud-Est». Ses recherches et conseils portent sur l'économie industrielle, la dynamique, les stratégies et les modèles d'agro-entreprises qui façonnent la demande et la durabilité des forêts et des ressources naturelles dans les pays tropicaux : industries forestières et produits de plantation tels que le palmier à huile, le caoutchouc, etc.

Session Posters A

Posters - Exposés flash / session A

Mercredi 18 novembre > 13:00-14:00

A01	**Vers un outil électronique pour aider à l'identification et à la reconnaissance des essences de bois.** *Baudrit Cédric, Michaud Franck, Fernandez Christophe*
A02	**Contribution à l'étude des propriétés mécaniques du bambou de Raphia vinifera L. Arecacea.** *Foadieng Emmanuel, Talla Pierre Kisito, Fogue Médard, Azeufack Ulrich*
A03	**Etude de l'influence de la teneur en eau sur le comportement mécanique des bois tropicaux.** *Nyobe Charly Julien, Oum Lissouck René, Yamb Emmanuel,Ayina Ohandja*
A04	**Potentialité du bois pour des applications de crash.** *Guélou Romain, Eyma Florent, Cantarel Arthur, Castanie Bruno*
A05	**L'apprentissage de la reconnaissance et de l'identification des essences de bois par une approche pratique et pragmatique : du recueil à la représentation des connaissances.** *Bodineau Matthieu, Michaud Franck*
A06	**Projet Gemm_Est : le retour du gemmage dans le Grand Est.** *Ribeiro Sébastien, Jolivet Yves, Vaultier Marie-Noëlle, Contini Adrien, Gerardin Philippe, Dumarcay Stéphane, Leneveu Luc*
A07	**Rôle des extractibles de bois face à la dégradation fongique.** *Noël Delphine, Nguyen Duy Vuong, Amusant Nadine, Gelhaye Eric, Morel-Rouhier Mélanie, Sormani Rodnay*
A08	**Méthode optique de mesures des grandeurs physiques d'un essai de fluage.** *Bontemps Arthur, Godi Gael, Moutou Pitti Rostand, Fournely Eric, Gril Joseph*
A09	**Etude de l'aptitude au déroulage de bois de tremble local destiné à la production de moules de cuisson.** *Lavalette Anne, De Bussac Olivier, Viguier Joffrey, Butaud Jean-Claude, Denaud Louis, Hubert Antoine, De La Rochere Eric, Colinot Alain, Lanvin Jean-Denis, Bourdin Jérôme*
A10	**Fissuration des rondelles de bois verts tropicaux soumises au séchage naturel : cas du Padouk et de l'Okoumé du Gabon.** *Nkene Mezui Estelle, Moutou Pitti Rostand, Pambou Nziengui Claude Feldman, Ikogou Samuel, Ekomy Ango Serge, Talla Pierre Kisito*
A11	**Modélisation en grands déplacements du comportement mécanique d'une tige lors d'un essai de flexion sur pied.** *Engonga Edzang Arnauld Clauvy's, Gril Joseph, Moutou Pitti Rostand, Badel Eric*
A12	**Utilisation de la stéréo-corrélation d'images numériques pour identifier le comportement au séchage du tube LVL fabriqué à partir de placage vert.** *Purba Citra Yanto Ciki, Marcon Bertrand, Viguier Joffrey, Denaud Louis*
A13	**Une file radiale de référence pour l'analyse de la xylogenèse chez les angiospermes.** *Noyer Estelle, Stojanović Marko, Horáček Petr*
A14	**Modèles biomimétiques de la paroi cellulaire végétale et modifications enzymatiques.** *Touzard Maeva, Heux Laurent*
A15	**Investigation sur les espèces de bois les plus utilisées à Madagascar.** *Rabevazaha Felanirina, Ramananantoandro Tahiana, Razafimahatratra Andriambelo Radonirina, Eyma Florent*
A16	**Spectroscopie proche infrarouge "low-cost" et analyses de données multivariées pour prédire le taux de rétention des produits de préservation du bois.** *Rubini Morandise, Dulucq Pauline, Charrier Bertrand*
A17	**Eléments finis pour la modélisation hygromécanique des panneaux de bois** *Colmars Julien, Dureisseix David, Montaigne Rémi*

non présenté lors des Journées

Vers un outil électronique pour aider à l'identification et à la reconnaissance des essences de bois

BAUDRIT Cédric[1], MICHAUD Franck[2], FERNANDEZ Christophe[3]

[1,3] INRAE, Université de Bordeaux-I2M, USC 1368, F-33400 Talence, France
[2] LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
cedric.baudrit@inrae.fr

Mots clefs : Modèle graphique probabiliste ; machine learning ; anatomie du bois ; approche macroscopique

Contexte et objectifs

La reconnaissance des essences de bois dans un morceau de bois ou un objet en bois et l'identification des caractéristiques anatomiques de ces essences sont des problèmes difficiles dans la mesure où le bois est un matériau complexe et hétérogène (Corbineau et Macchioni 2015). La reconnaissance et/ou l'identification d'une essence de bois, à l'échelle d'une pièce, nécessite de pouvoir manipuler, agréger et intégrer un certain nombre de variables hétérogènes simultanément. S'il existe déjà des outils pour la reconnaissance des essences, ils sont toutefois principalement basés soit sur de l'analyse d'image ou mesures physiques (approche boite noire de l'identification (Wielenzynski 2016), soit sur le principe d'élimination par filtre (approche de sélection sans véritable prise en compte de l'utilisateur et des spécificités ou difficultés de la démarche en pratique), soit ce sont des outils de spécialiste qui nécessitent un niveau de connaissances très élevé (chercheur du domaine). Il est donc nécessaire de proposer un outil de simulation capable de mutualiser des connaissances hétérogènes dans le but (1) de guider, en situation de pratique professionnelle sur site, un utilisateur, un apprenant ou un expert dans l'identification d'une essence au travers d'un ensemble de questions et/ou (2) de fournir des conclusions et des propositions pertinentes de descripteurs, caractéristiques les plus vraisemblables d'une essence (re)connue (Fig. 1). Dans ce but, nous nous concentrons sur l'utilisation du concept de réseaux bayésiens (BNs) (Jensen et Nielsen 2010, Pearl 1988) qui fournit un formalisme mathématique pratique permettant de décrire des systèmes complexes entachés d'incertitude. Ils s'appuient sur les modèles graphiques probabilistes où la structure du réseau fournit une interface intuitive à travers laquelle un individu peut modéliser des ensembles de variables en interactions et fournit une représentation qualitative des connaissances. L'incertitude relative au système est prise en compte en quantifiant la dépendance entre les variables à l'aide de probabilités conditionnelles. Les BNs permettent de combiner différentes sources de connaissances expertes avec des données expérimentales à différents niveaux et échelles de connaissances. Cette approche a été étudiée et utilisée dans des domaines qui vont du biomédical à la pétro-physique (Wiegerinck et al 2013). L'objectif est donc de concevoir un outil électronique utilisable sur le terrain (ex. smartphone/tablette) pour aider à l'apprentissage et à la reconnaissance des essences de bois.

Matériel et méthode

Un réseau Bayésien (BN) (Jensen et Nielsen, 2010 ; Pearl, 1988) est un modèle graphique probabiliste représentant un ensemble de variables aléatoires en interaction sous la forme d'un graphe. Formellement, un réseau Bayésien est un Graphe orienté acyclique (DAG) dont les nœuds représentent des variables aléatoires et dont les arcs manquants codent les indépendances conditionnelles entre les variables.

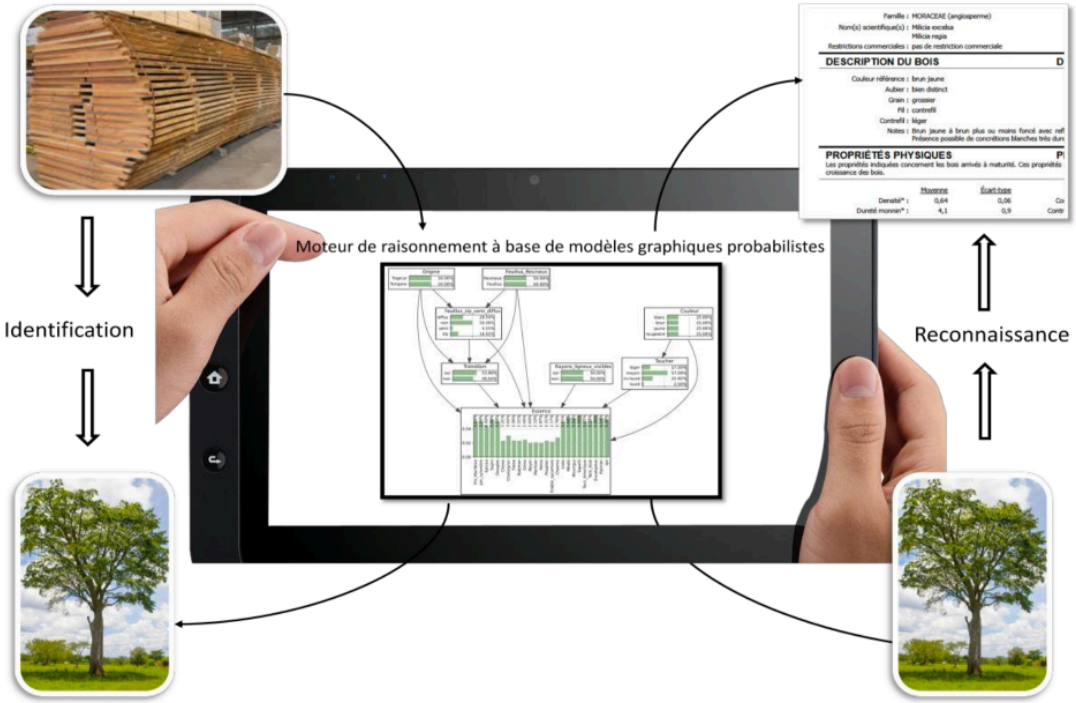


Fig. 1: outil électronique pour aider à identifier et reconnaitre des essences de bois

Le graphe est appelé la structure du réseau et les nœuds contenant l'information probabiliste sont appelés les paramètres du réseau. Dans un réseau Bayésien, la distribution de probabilités jointes des valeurs des nœuds peut être écrite comme le produit de la distribution de probabilité de chaque nœud et de ses parents. Si l'ensemble des nœuds parents d'un nœud X_i est désigné par $Pa(X_i)$, nous avons :

$$P(X_1, \cdots, X_n) = \prod_{i=1}^{n} P\big(X_i | \mathrm{Pa}(X_i)\big) \qquad \text{(Eq.1)}$$

où $P(X_1, \cdots, X_n)$ représente la probabilité jointe des variables $X_1, \cdots, X_n$ et $P\big(X_i|\mathrm{Pa}(X_i)\big)$ représente la probabilité conditionnelle associée à la variable X_i sachant $\mathrm{Pa}(X_i)$. Différentes techniques d'apprentissage permettent d'identifier soit la structure du graphe (*i.e* la topologie), soit les paramètres du réseau (*i.e* les distributions de probabilités conditionnelles) ou une combinaison des deux à partir de données substantielles et/ou incomplètes combinées à une élicitation par des experts (Buntine 1996, Heckerman 2008, O'Hagan 2006). Ji et al. (2015) donnent un aperçu des méthodes d'apprentissage des paramètres dans les réseaux bayésiens. L'utilisation de ces réseaux consiste en une "requête" exprimée sous forme de probabilités conditionnelles. La tâche la plus courante consiste à estimer les probabilités marginales $P(X_Q | X_E)$ où X_Q est un ensemble de variables de requête et X_E un ensemble de variables observées. L'inférence consiste alors à calculer la probabilité de chaque état d'une variable X_Q lorsque nous connaissons l'état pris par les autres variables X_E. Pour plus de détails sur l'inférence, le lecteur peut se référer à Guo et Hsu (2002), Hrycej (1990), Salmeron *et al*. (2000), Madsen et Jensen (1999) qui présentent différents types d'algorithmes d'inférence (inférence exacte et approximative) selon la complexité et la taille du réseau (Cooper 1990).

Résultats et discussion

La structure du réseau a été établie par expertise pour mener 2 types de raisonnement à savoir (1) proposer l'essence de bois la plus vraisemblable qui compose l'objet en bois observé en répondant à un questionnaire et (2) proposer l'ensemble des descripteurs les plus vraisemblables face à une essence reconnue. Chaque nœud représente une caractéristique des

essences et les paramètres du réseau ont été estimés à partir de la connaissance experte et d'une base de données composée de 25 essences de bois. Formellement, nous allons estimer les probabilités suivantes :

Proba(Essence | Descripteurs) et Proba(Descripteurs | Essence reconnue)

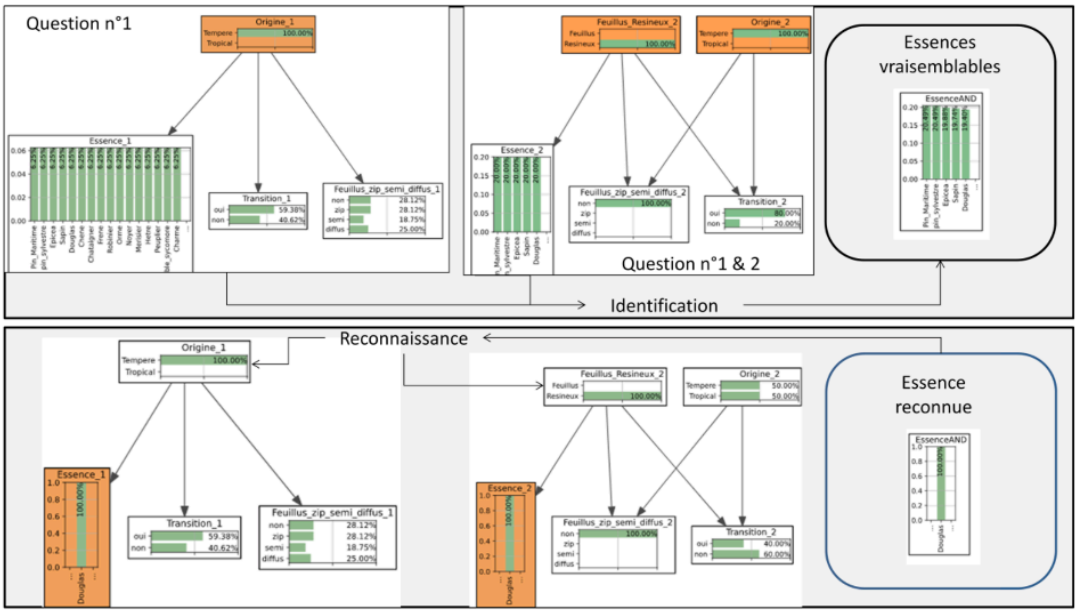


Fig. 2 : Simulation du raisonnement pour (1) identifier une essence de bois à partir d'un questionnaire (haut) et (2) reconnaitre les caractéristiques du Douglas ou *Pseudotsuga menziesii* (bas)

Le modèle a été construit et implémenté en utilisant la bibliothèque python pyAgrum basée sur la bibliothèque C++ aGrUM (Gonzales et al., 2017) dédiée aux modèles graphiques probabilistes permettant de créer, gérer et effectuer des inférences avec les réseaux bayésiens. La Fig. 2 (haut) présente par exemple la construction du modèle à partir des réponses aux 2 questions suivantes : Quelle est l'origine géographique de l'essence de bois utilisée (question n°1) ? S'agit-il d'un résineux ou d'un feuillus (question n°2) ? L'utilisateur répond par exemple à la première question par : « le bois utilisé provient d'une zone tempérée » (*ie* Proba(Origine_1=Tempere)=1 dans le modèle, voir Fig. 2) ; le modèle élimine ainsi toutes les essences de bois tropicales et donne une indication sur la transition abrupte ou progressive entre les deux parties du cerne (transition entre le bois initial et le bois final). Le modèle estime ainsi qu'à 59.38% la transition sera vraisemblablement progressive (*ie* Proba(Transition_1=oui|Origine_1=Tempere)=59.39). Cette vraisemblance est renforcée à 80% en répondant à la question 2 par le fait que l'essence de bois fait partie des résineux (*ie* Proba(Transition_1=oui|Origine_1=Tempere, Feuillus_Resineux_2=Résineux)=80%). Le fait d'observer finalement une transition brutale par la suite pourrait remettre en cause l'origine du bois par exemple. Le modèle ne propose finalement à partir des réponses aux questions 1 & 2 que (voir la variable EssenceAND Fig. 2) 5 choix possibles d'essences sans pouvoir les discriminer. Ceci indique qu'il faut aller plus loin dans le questionnaire pour réduire le nombre de choix. La partie inférieure de la Fig.2 présente la cartographie des caractéristiques les plus vraisemblables face à une essence reconnue à savoir le Douglas. Le modèle estime que le Douglas est un résineux d'origine tempérée, (ie Proba(Origine_1=Tempere|essence= Douglas)=1 & Proba(Feuillus_Resineux_2=Resineux|essence= Douglas)=1).

Conclusion et perspectives

Un modèle générique à base de graphes probabilistes a été implémenté permettant à la fois de proposer (1) l'essence la plus vraisemblable qui a été utilisée ou présente dans un morceau de bois ou un objet en bois et (2) un ensemble de descripteurs vraisemblables qui caractérise une essence reconnue. Les descripteurs choisis sont des observables à l'échelle macroscopique (ou un grossissement maximal de x10), plus ou moins facilement accessibles (selon la qualité de la pièce et de l'état de surface), qui s'inscrivent dans la démarche pratique et pragmatique d'apprentissage de l'identification et la reconnaissance des essences de bois déployée depuis 2014 à l'Ecole Supérieure du Bois.

Remerciements

Ces travaux sont en partie financés par le programme de coopération franco-québecois CHAMPLAIN

Références

Buntine, W. (1996) A guide to the literature on learning probabilistic networks from data. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 8, 195–210.

Cooper, G. F. (1990) The computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks. Artificial intelligence, *42*(2-3), 393-405.

Corbineau P., Macchioni N. (2015) Connaitre, Reconnaitre et Nommer le Bois « Savoir&Faire : le bois » sous la direction d'Hugues Jacquet.

Gonzales C., Torti L., Wuillemin P. (2017) Agrum: a graphical universal modem framework. In Int. Conference on Industrial, Engineering, Other Applications of Applied Intelligent Systems, Arras, France. Springer-Verlag.

Guo H., Hsu W. (2002) A survey of algorithms for real-time Bayesian network inference. In Join Workshop on Real Time Decision Support and Diagnosis Systems.

Heckerman D. (2008) A Tutorial on Learning with Bayesian Networks, In Innovations in Bayesian networks (pp. 33–82), Springer, Berlin, Heidelberg.

Hrycej T. (1990) Gibbs sampling in Bayesian networks, Artif. Intell. Rev, 46(3), 351-363.

Jensen F.V., Nielsen,T.D. (2010) Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer.

Ji Z., Xia,Q., Meng G. (2015) A review of parameter learning methods in Bayesian network. In International Conference on Intelligent Computing (pp. 3-12). Springer, Cham.

Madsen A. Jensen F. (1999) Lazy propagation: a junction tree inference algorithm based on lazy evaluation, Artificial Intelligence, 113(1-2), 203–45.

O'Hagan A. (2006) Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities, Wiley, New York.

Pearl J. (1988) Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann, San Diego, 552p.

Salmeron A., Cano A., Moral S. (2000) Importance sampling in Bayesian networks using probability trees, Computational Statistics and Data Analysis, 34(4), 387–413.

Wiegerinck W., Burgers W., Kappen B. (2013) Bayesian networks, introduction and practical applications. In Handbook on Neural Information Processing (pp. 401-431). Springer, Berlin, Heidelberg.

Wielezynski F. (2016) Rapport du REdEME, Rapport CODIFAB REF. LBO/DR/403/16/207 – 07/06/2016.

Contribution à l'étude des propriétés mécaniques du bambou de *Raphia vinifera* L. Arecacea

FOADIENG Emmanuel[1,2], TALLA Pierre Kisito[2], FOGUE Médard[2], AZEUFACK Ulrich[1,2]

[1]ENSET de Kumba, Université de Buea, Cameroun
[2]Faculté des Sciences, UR-ISIE, UR-2MSP, Université de Dschang, Cameroun
foidienge@yahoo.fr

Mots clefs : bambou de Raphia ; matériau composite ; module d'élasticité ; cisaillement ; résistance.

Contexte et objectif

Le **Raphia** est un genre de palmier à croissance rapide, de la famille des Arecaceae que l'on rencontre dans les milieux marécageux et le long des cours d'eau. Dans cette étude, le « bambou de Raphia » (Ingram et al, 2010) est le pétiole d'une palme de *Raphia vinifera* L. Arecacea largement utilisé dans notre région comme matériau de construction. C'est un matériau bon marché, abondant et à croissance rapide pouvant répondre à la nécessité d'une vaste économie de logement. Pour un usage sécurisé de ce matériau dans la construction, la maitrise de ses propriétés mécaniques est une nécessité.

A notre connaissance, il n'existe malheureusement à ce jour aucune étude portant sur la détermination des propriétés mécaniques du bambou de Raphia. Par ailleurs, la production et les utilisations de ce bambou africain reposent uniquement sur un savoir-faire ancestral. Quelques informations sur ses propriétés de base ont été examinées, mais l'étude de ses propriétés mécaniques et les applications comme matière première pour les produits composés est très limitée. L'optimisation des propriétés du bambou de Raphia en vue de sa valorisation nécessite la connaissance de ses propriétés mécaniques. Dans cette étude, nous nous proposons d'évaluer expérimentalement les différentes propriétés élastiques.

Dans nos différents essais, nous avons assimilé le bambou de Raphia au bois afin d'utiliser les lois et les techniques appliquées sur le bois (Natterer et al. 2004, Chih-Lung, 2007, Kelley et al. 2004).

Matériels et méthodes

- *Caractéristiques de l'espèce étudiée :* le bambou de Raphia, de nom scientifique *Raphia vinifera* L. Arecacea, se présente sous forme d'une touffe constituée de plusieurs palmes. Le matériau étudié ici est le pétiole d'une palme de ce Raphia appelé localement « dink ». Notre étude se porte sur des échantillons prélevés au quartier Mbieng, du village Bandjoun, arrondissement de Poumougne, département de KOUNG-KHI, Région de l'Ouest Cameroun. Mbieng est situé à 5°25 de latitude Nord, 10°25 de longitude, et à 1509 m d'altitude (Institut Géographique National 1973). Après trois mois de séchage et de conditionnement dans le laboratoire à la température d'environ 24°C et 70 % d'humidité relative, douze échantillons ont été sélectionnés pour les tests.

- *Traction simple :* elle a permis d'évaluer le module d'élasticité de la coque et sa résistance. Les éprouvettes d'essai doivent être de section transversale entière et de longueur suffisante pour fournir une longueur d'essai, dégagée des mors de la machine, égale à au moins dix fois le diamètre de la section selon la norme NE NF 408 (AFNOR, 2004) (Fig. 1).

Fig. 1 : Photo d'une éprouvette de la coque

Un chargement progressif est appliqué à l'éprouvette jusqu'à sa rupture dans certains cas. Les déplacements et les efforts appliqués à l'éprouvette sont enregistrés progressivement puis convertis respectivement en déformation et en contrainte.

- *Flexion 4 points :* des 12 échantillons, nous avons extrait 48 poutres et 12 éprouvettes témoins d'humidité. Nous avons utilisé la flexion 4 points parce que la courbe déformation-contrainte qui en découle est très proche de celle d'un chargement uniformément reparti fréquemment rencontré dans les structures. Les éprouvettes ont été sciées selon la norme NF EN 408 (AFNOR, 2004). Dans chaque essai, nous disposons d'une poutre de diamètre moyen d = (36 ± 3,3%) mm peu variable, de longueur 380 mm.

Pour minimiser les effets indésirables de flexion, deux jauges d'extensométrie de résistance 120Ω ±0.3% ont été collées de façon symétrique sur l'éprouvette et parallèlement à son axe (Talla et al, 2007). Elles sont câblées de façon à réaliser un demi-pont de Wheatstone (Avril et Brule, 1984).

Les déformations sont mesurées directement à l'aide d'un pont d'extensométrie EI 616 de marque DELTALAB qui affiche les déformations avec une précision de l'ordre de 1µm/m.

- *Flexion 3 points :* ici nous avons utilisé la flexion 3 points à cause de la grande souplesse des éprouvettes de la moelle très sensibles à la déformation en flexion sous faibles charges. Les douze éprouvettes d'essai de la moelle du bambou de Raphia ont chacune une longueur de 380 mm et une section moyenne de 20×20 mm^2. Les déformations sont mesurées grâce à un comparateur analogique de marque SEB (Antichoc) et de précision 1%, son état poreux ne permet pas la fixation des jauges d'extensométrie.

Résultats et discussion

Les conditions climatiques à l'intérieur du laboratoire sont constantes, soit une température de 24°C et un taux d'humidité relatif de l'air de 70%. Douze éprouvettes ont été choisies pour chaque série d'essais. Le Tab. 1 donne la densité et la teneur en eau des éprouvettes pendant les essais. Les propriétés mécaniques de la moelle sont données dans les Tab. 2 et 3 et celle de la coque dans le Tab. 4.

Tab. 1 : Caractéristiques moyennes des 12 éprouvettes par catégorie

EPROUVETTE	COQUE			MOELLE			BAMBOU		
	H (%)	da	Id	H	da	Id	H (%)	da	Id
moyenne	12,95	0,83	0,71	13,73	0,18	0,13	12,22	0,28	0,25
Ecart-type	0,93	0,08	0,11	0,56	0,04	0,04	0,99	0,02	0,03

H : Teneur en eau ; da : densité anhydre, Id : infradensité

Pour expliquer les propriétés mécaniques du bambou de Raphia nous avons considéré que ce matériau est un assemblage de fibres parallèles représentées par la coque (renfort), et une

matrice représentée par la moelle. Connaissant le module d'élasticité de la moelle et de la coque, nous avons utilisé la loi des mélanges (Pommier 2010, Guitard 1987, Moutee 2006, Natterer et al. 2004) pour calculer celui du bambou de *Raphia vinifera* (Tab. 5).

Tab. 2 : Propriétés mécaniques moyennes des 12 éprouvettes de moelle en flexion

EPROUVETTE	E_m (MPa)	Pmax (N)	Fm (MPA)	γ %
MOYENNE	**959,0**	**161,7**	**738,2**	**91,5**
ECART-TYPE	9,39	9,49	42,74	2,26

E_m : Module d'élasticité longitudinal ; Pmax : Force maximale ; Fm : résistance en flexion ; γ: volume relatif des pores

Tab. 3 : Propriétés élastiques moyennes des 12 éprouvettes de moelle en cisaillement

EPROUVETTE	Ea (MPa)	G (MPa)
MOYENNE	**52,1**	**5,9**
ECART-TYPE	6,87	0,57

Ea : Module apparent ; G : module de cisaillement longitudinal

Tab. 4 : Propriétés mécaniques moyennes des 12 éprouvettes de coque en traction axiale

EPROUVETTE	E_C (MPa)	Pmax (KN)	Fm (Mpa)	γ %
MOYENNE	**17043,4**	**2,01**	**246,9**	**53,8**
ECART-TYPE	852,5	0,1	12,5	4,8

Ec : Module d'élasticité, Pmax : Force maximale ; Fm : résistance en traction ; γ: volume relatif des pores

Tab. 5 : Propriétés mécaniques moyennes des 12 éprouvettes mesurées et calculées du bambou de raphia

EPROUVETTE	E (MPa)			Pmax (N)	Fm (MPa)
	Eg_L	$Eg_{Lcal.}$	$Eg_{Tcal.}$		
Moyenne	**13008,2**	**12383,9**	**3148,9**	**1339,2**	**5942,5**
Ecart-Type	1244,9	1006,1	261,8	134,3	687,4

EgL : Module d'élasticité mesuré; EgL-cal, EgT-cal : valeurs longitudinal et transversale calculées, respectivement ; Pmax : charge ultime à la rupture ; Fm : résistance

Conclusion et perspectives

L'objectif général de cette étude était l'étude des propriétés élastiques du bambou de Raphia sous charge de flexion et la résistance, à température interne du laboratoire. Des essais statiques, nous avons évalué les modules d'élasticité et de cisaillement, et la résistance du bambou de raphia. Il en ressort que la moelle est le maillon faible du bambou de Raphia responsable de sa grande souplesse puisque la coque peut être classée parmi les bois durs. Le module d'élasticité du bambou de *Raphia vinifera* L. Arecacea se rapproche de celui des bois de construction, on peut le classer parmi les bois légers, utilisés en décoration et en revêtement interne.

Le module d'élasticité $E_{gL,cal}$ obtenu à partir de la loi des mélanges est proche du module d'élasticité E_{gL} obtenu expérimentalement (Tab. 5) avec un écart moyen d'environ 624 Mpa. Ce qui confirme le fait que ce matériau peut être considéré comme un matériau composite à fibres parallèles.

Pour tenir compte des autres aspects non considérés dans notre étude, des investigations doivent être menées afin de constituer une base de données expérimentales complètes sur les propriétés élastiques, viscoélastiques, viscoplastiques et mécanosorptives de ce matériau. Sans être exhaustif, telles sont quelques pistes susceptibles d'être explorées en vue d'une meilleure maîtrise de ce matériau qui offre des perspectives intéressantes pour l'ameublement, le logement et la décoration.

Références

AFNOR (2004), Norme Européenne/ Norme Française 408 (NH NE 408) « Bois de structure et bois lamellé collé », ISSN 0335-3931, Indice de classement P 21-302, 1er tirage 2004-03-F.

Avril J., Brule J.C. (1984) Encyclopédie d'analyse des contraintes, Pub. Micromesures, 98 boul. Gabriel Péri, 92240 Malakoff, France.

Chih-Lung Cho (2007) Comparison of three methods for determining Young's modulus of wood, Taiwan Journal For Science 22 (3):297-306.

Guitard D. (1987), Mécanique du matériau bois et composites, Cepadues-Editions, Toulouse, France, cité par Moutee (2006).

Ingram V., Tieguhong J.C., Nkamgnia E.M., Eyebe J.P. and Npawe M. (2010) Bamboo production to consumption system, Cameroon. CIFOR (Center for International Forestry Research), Bogor, Indonesia.

Institut Géographique National, 2e édition (1973), 136 bis rue de Grenelle,75 Paris 7, Centre de Yaoundé.

Kelley S.S., Rials T.G., Snell R., Groom L.H., Sluiter A. (2004) Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. Wood Sci. Technol. 38, 257–276. https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5

Moutee M. (2006) Modélisation du comportement du bois au cours du séchage, Thèse Université de Laval, Québec, Canada

Natterer J., Sandoz J.L., Rey M., Fiaux M. (2004) Construction en bois, matériau, technologie et dimensionnement, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol 13, Deuxième édition revue et augmentée, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, CH.

Pommier S. (2009-2010) Mécanique des Matériaux, Université Pierre et Marie Curie, CNRS-CACHAN, La Science à Paris.

Talla P.K., Pelap F.B., Fogue M., Fomethe A., Bawe G.N., Foadieng E. and Foudjet A. (2007) Nonlinear Creep behaviour of Raphia vinifera L. Arecacea, International Journal of Mechanics and solids, Vol. 2, N° 3.

Potentialité du bois pour des applications de crash

GUELOU Romain[1], EYMA Florent[1], CANTAREL Arthur[1], RIVALLANT Samuel[1], CASTANIE Bruno[1]

[1]Institut Clément Ader (ICA), ISAE, CNRS UMR 5312-INSA-Mines Albi-UPS, Toulouse, France
romain.guelou@iut-tarbes.fr

Mots clefs : tubes bois ; peuplier, crash; statique ; dynamique

Contexte et objectifs

A l'impact basse énergie, Susainathan a étudié diverses configurations de plaques sandwichs ayant des peaux composites (carbone, verre, et lin) et une âme en contreplaqué de peuplier/okoumé. Les plaques sandwichs ont montré une réponse intéressante en compression après impact avec notamment la présence d'un plateau sur la courbe force-déplacement (Susainathan et al. 2019). Du fait des bonnes caractéristiques du bois après impact, la question de l'utilisation de ces structures pour des applications de crash s'est donc posée. Pour une application de crash, la pièce dite « crash-box » est une pièce sacrificielle ayant pour objectif d'absorber un maximum d'énergie pour protéger la structure et donc les occupants.

Fig. 1 : Tubes [90/0$_4$/90]

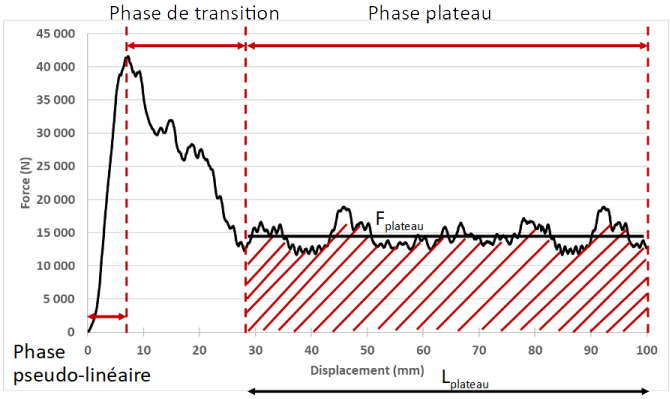


Fig. 2 : Courbe force-déplacement ($EA_{plateau}$)

Nous avons donc décidé d'étudier le comportement au crash de plusieurs tubes réalisés à l'aide de placages de peuplier (Fig. 1). Le mode de ruine généré par la compression de tubes impacte directement l'absorption d'énergie. Trois types de mode de ruine stables ont été identifiés par Hull (1991), et Farley et Jones (1989) : l'évasement (division de la paroi en deux faisceaux), la fragmentation (création de débris), et le flambage local (anti ou symétrique par exemple). Guillon (2008) a montré qu'en fonction du mode de ruine obtenu, la quantité d'énergie absorbée est différente.

De la courbe force-déplacement obtenue pendant la compression (Fig. 2), nous avons extrait plusieurs grandeurs et critères de performances. Le pic d'effort est noté F_{max}. Lorsqu'un plateau d'effort existe, l'effort moyen dans le plateau est appelé $F_{plateau}$. On peut alors définir le CFE (Crush Force Efficiency), ratio entre l'effort moyen et l'effort maximum ($F_{plateau}/F_{max}$). En général, lors de la conception d'un absorbeur de choc, on recherche un CFE le plus proche de 1 pour limiter les efforts dans le reste de la structure lors d'un crash. L'énergie spécifique d'absorption n'est pas calculée à partir de l'ensemble de la courbe, mais uniquement à partir de la phase stabilisée de l'écrasement (Fig. 2). Ainsi, on définit également l'énergie absorbée dans

le plateau ($EA_{plateau}$), qui dépend de la longueur réelle de la phase stable ($L_{plateau}$), et on en déduit l'énergie spécifique d'absorption pendant le plateau : $SEA_{plateau} = \frac{F_{plateau}}{\rho \times S}$, en J/g, avec ρ la masse volumique moyenne du tube (colle + placages) et S la section. Une seconde énergie, EA_{tot_80mm} a été définie pour comparer les niveaux d'énergie statique et dynamique (les longueurs d'écrasement n'étant pas identiques). Cette énergie correspond à l'aire totale sous la courbe jusqu'à 80 mm d'écrasement.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité d'absorption d'énergie en crash du bois en statique et en dynamique, et ainsi comparer les performances mais aussi les modes de ruine. Pour ce faire, nous avons étudié quatre configurations à 6 iso-plis dans le but d'étudier l'influence de la position et du nombre de placages orientés à 90° et 0° : $[0_6]$; $[90/0_4/90]$; $[90_2/0_2/90_2]$; et $[0_4/90_2]$. Pour chaque configuration, 3 échantillons ont été testés. La meilleure des configurations a été retenue pour des essais dynamiques.

La fabrication des tubes a été réalisée à partir de placages de peuplier I214 fournis par l'entreprise Garnica. L'épaisseur de ces plis est de 1 mm. Les tubes ont un diamètre intérieur de 50 mm pour une longueur de 120 mm. L'épaisseur totale des tubes est comprise entre 6.25 et 6.90 mm. La densité moyenne des tubes (placages et colle) est de 0.544 (écart-type de 0,014). La colle utilisée pour encoller les placages est la Kleiberit PUR 510 Fiberbond : colle monocomposante à base de polyuréthane durcissant par réaction avec l'humidité, avec un grammage de 250 g/m^2.

Résultats expérimentaux et discussion

Le Tab. 1 présente les résultats d'écrasements obtenus en statique (avec une vitesse d'écrasement de 5 mm/min) et en dynamique (essais réalisés à l'aide d'un poids tombant générant une vitesse d'écrasement de 5,7 m/s). Des essais statiques, nous avons pu en déduire que (Fig. 4) :

- Orienter tous les placages de peuplier à 0° n'est pas un bon choix car cela génère un mode de ruine instable avec peu d'absorption d'énergie (Fig. 4 (a)).
- Dès l'apparition d'un placage à 90° à l'intérieur et à l'extérieur (ou à l'extérieur uniquement), cela produit un « hoop » effect et le tube aura un mode de ruine stable avec la présence d'un plateau d'écrasement quelle que soit la configuration.

Tab. 1 : Résultats des écrasements statiques et dynamiques

		Masse g	Epaisseur mm	F_{max} N	$L_{plateau}$ mm	$F_{plateau}$ N	CFE /	$EA_{plateau}$ J	EA_{tot_80mm} J	SEA plateau J/g
Statique	$[0_6]_{moyenne}$	76.2	6.7	38 379	/	/	/	/	/	/
	Ecart-type	1.07	0.09	2 149	/	/	/	/	/	/
	$[90/0_4/90]_{moyenne}$	76.6	6.8	29 837	76.9	21 019	0.71	1 619	1 632	31.6
	Ecart-type	1.8	0.10	2 103	1.7	3 613	0.15	307	247	5.4
	$[90_2/0_2/90_2]_{moyenne}$	73.1	6.7	19 403	62.2	11 482	0.62	726	981	18.0
	Ecart-type	2.55	0.11	876	7.18	2 721	0.17	253	152	3.6
	$[0_4/90_2]_{moyenne}$	73.0	6.6	25 977	55.3	13 483	0.52	743	1 193	21.3
	Ecart-type	0.59	0.01	3 430	1.4	2 976	0.08	145	234	4.6
Dynami	$[90/0_4/90]_{moyenne}$	73.7	6.5	45 084	54.6	17 939	0.40	982	1 618	28.5
	Ecart-type	1.44	0.16	1 951	0.4	3 538	0.07	212	173	5.4

- Trop de couches à 90° ne sont pas nécessairement efficaces en termes de quantité d'énergie absorbée : perte de 43% de SEA entre les deux configurations $[90_2/0_2/90_2]$ et $[90/0_4/90]$.
- La position des couches à 90° a également son influence sur la quantité d'énergie absorbée. En effet en comparant les configurations $[0_4/90_2]$ et $[90/0_4/90]$, un gain de 33% de SEA est obtenu en confinant complètement les couches à 0°: comme pour le « hoop » effect, également constaté pour les matériaux composites (Hull 1991).
- Au niveau des modes de ruine, la présence d'une ceinture (plis à 90°) permet la formation successive et antisymétrique de bourrelets générés par du flambage local (Fig. 3a).

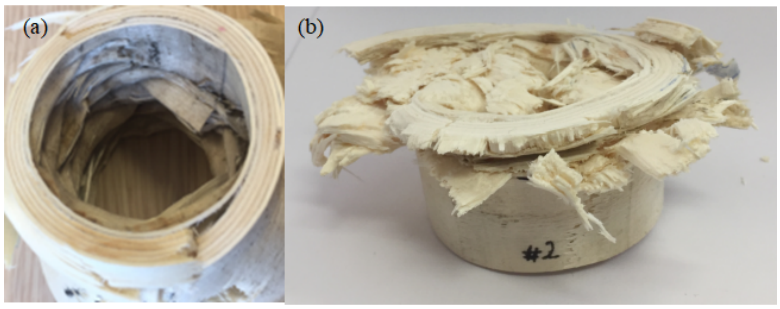


Fig. 3 : Ruines du tube $[90/0_4/90]$-#2 (a) en statique (b) en dynamique

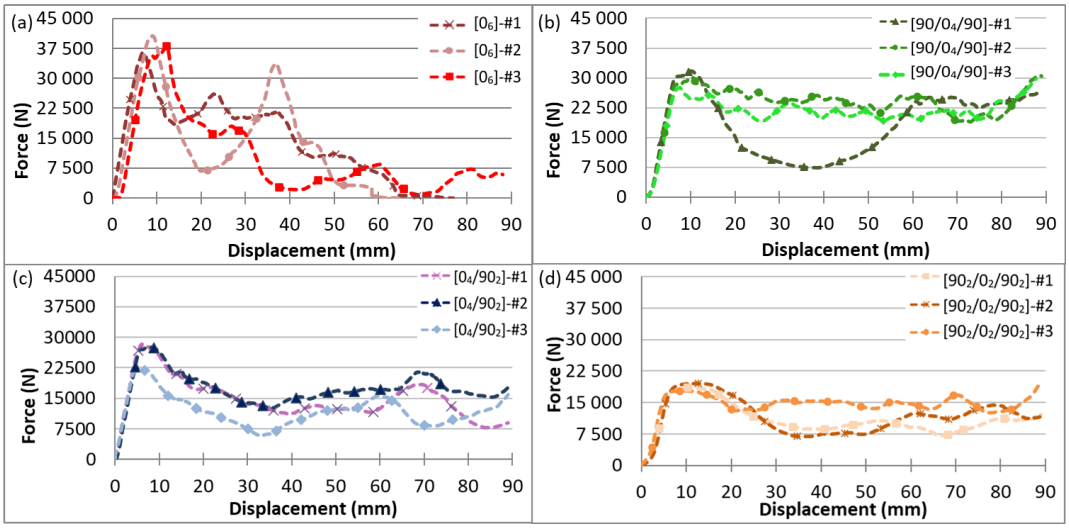


Fig. 4 : Courbe statique force-déplacement (a) $[0_6]$ (b) $[90/0_4/90]$ (c) $[0_4/90_2]$ (d) $[90_2/0_2/90_2]$

Les essais dynamiques menés sur la configuration $[90/0_4/90]$ nous ont montré que (Fig. 5) :

- Le pic de charge en dynamique est plus important qu'en statique.
- La rigidité dynamique apparente (pente pseudo-linéaire, en réalité le chanfrein est déjà endommagé) est plus importante qu'en statique : une augmentation de 88% est à noter (respectivement 515 MPa et 970 MPa pour les essais statiques et dynamiques, valeurs moyennes).
- En dynamique, le mode de ruine change et voit de l'évasement avec de la fragmentation générant des débris macroscopiques et microscopiques (Fig. 3b).

Conclusion et perspectives

Les essais de crushing statiques et dynamiques sont plutôt prometteurs pour un matériau naturel et écologique comme le bois. Au niveau des modes de ruine, la présence d'une ceinture (plis à 90°) permet la formation successive et antisymétrique de bourrelets générés par du flambage local, en statique. En dynamique, le mode de ruine change et voit de l'évasement avec de la fragmentation générant des débris macroscopiques et microscopiques. La meilleure des

configurations statiques étudiée, et testée en dynamique, est la suivante : [90/0$_4$/90] atteignant une énergie absorbée moyenne de 1 632 J en statique, et de 1 618 J en dynamique avec une SEA moyenne de 30 J/g. Le passage d'une sollicitation statique à dynamique modifie fortement le pic de charge et la rigidité des tubes qui voient une forte augmentation pour une énergie absorbée et une SEA quasi identique. Seul le CFE est détérioré en dynamique du fait de l'augmentation du pic de charge. Enfin, la phase de transition est plus importante en dynamique qu'en statique.

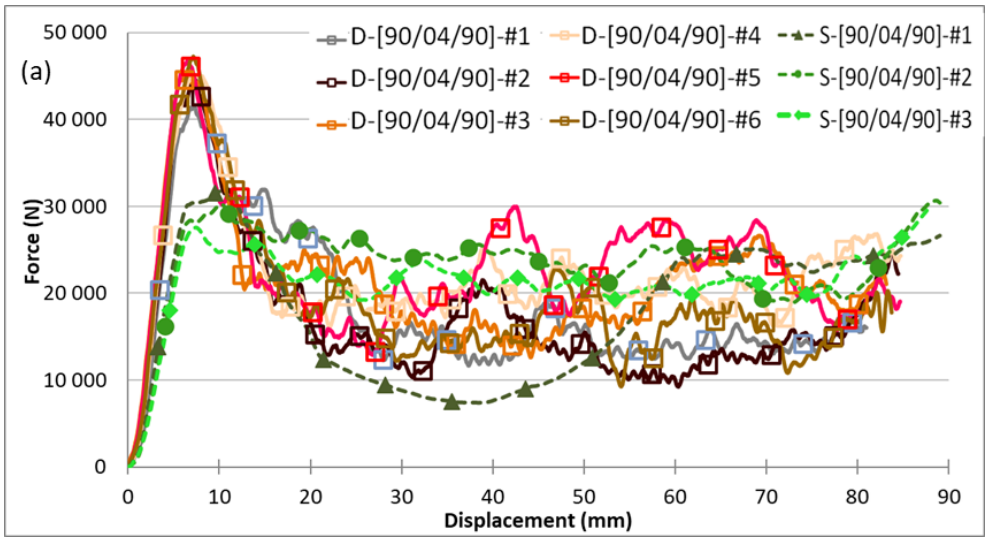


Fig. 5 : Comparaison des courbes force-déplacement des tubes statiques et dynamique

Ces résultats sont très prometteurs pour la suite à donner quant à l'utilisation d'éco-matériaux à base de bois pour des applications de crash. Par ailleurs, pour une meilleure compréhension du comportement au crash de tubes en peuplier, une modélisation numérique est nécessaire pour développer un modèle d'endommagement matériau optimisé pour les placages de peuplier.

Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise Garnica pour le don des placages I214 qui nous a permis de réaliser cette étude.

Références

Farley G.L., Jones M.R. (1989) Energy absorption capability of composites tubes and beams, PhD Thesis, NASA TM 10634.

Guillon D. (2008) Etude des mécanismes d'absorption d'énergie lors de l'écrasement progressif de structures composites à base de fibre de carbone. PhD Thesis, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, ISAE, Ecole doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil et procédés.

Hull D (1991) A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. Composites Science and Technology 40 (4): 377–421. https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90031-j

Susainathan J., Eyma F, De Luycker E., Cantarel A., Bouvet C., Castanie B. (2019) Experimental investigation of compression and compression after impact of wood-based sandwich structures. Composite Structures 220 (juillet): 236-49. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.095

L'apprentissage de la reconnaissance et de l'identification des essences de bois par une approche pratique et pragmatique : du recueil à la représentation des connaissances

BODINEAU Matthieu, MICHAUD Franck

LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, F-44306 Nantes, France
franck.michaud@esb-campus.fr

Mots clefs : apprentissage ; cartes conceptuelles ; essences de bois ; identification ; ingénierie des connaissances ; reconnaissance

Contexte et objectifs

Aujourd'hui, la connaissance liée à la reconnaissance/ l'identification des essences de bois est détenue par un nombre limité de spécialistes. S'il existe bien des formations disponibles, on constate certaines difficultés dans l'activité professionnelle lié au commerce du bois, qu'il s'agisse de litige ou de problématiques liées aux essences de bois et à leur classement CITES (Douanes, Lutherie, …). Un certain nombre d'outils se sont développés au cours des dernières années ayant pour principaux objectifs : soit d'apporter une réponse d'identification ; soit la mise à disposition de savoirs. Le parti pris de nombreuses solutions est d'apporter directement une information (approche boite noire) ou dans certains cas d'accompagner des spécialistes du domaine (Trouy 2020, 2015, Ruffinato et al. 2017, Venet 1986, Meier 2020, IWG 2005, Augustavaud 2018, CODIFAB 2019, Dallwitz 2020).

Partant du principe que la reconnaissance du matériau est à la base de son bon usage, il est nécessaire de transmettre une connaissance pratique aux professionnels de la filière via un outil pragmatique. Fort de l'expérience initiée au sein du laboratoire d'anatomie et de la xylothèque de l'ESB ces dix dernières années, la volonté de transposition de la démarche en situation professionnelle a été initiée. Ce travail a pour objectif d'aboutir à une architecture d'outil d'ingénierie de la connaissance qui permette, un large accès à distance, une navigation ergonomique et une représentation fidèle des connaissances liées à la question de l'apprentissage de la reconnaissance et de l'identification des essences de bois. Le but est simple : donner les moyens aux différents acteurs de nommer correctement leur matériau.

Matériel et méthodes

La méthodologie choisie est basée sur les travaux réalisés pour la création du livre de connaissance sur la valorisation des produits à base de bois en fin de vie (projet Teambois – Valbois[1], thèse de Jmal 2013). Dans notre cas, il s'agit d'appliquer des techniques de l'ingénierie des connaissances et les étapes (Milton 2007) permettant de représenter des connaissances à la fois explicites et tacites sous un format favorisant leur transmission. La Fig. 1 illustre la démarche qui fait appel à différents acteurs dont un panel d'expert en anatomie du bois.

Le modèle de représentation est la carte conceptuelle, ou plus précisément un ensemble de cartes interconnectées. Les cartes de connaissance, aussi appelées ontologies, se définissent comme étant *« un ensemble structuré de concepts permettant de donner un sens aux*

[1] https://valbois.uved.ecoledubois.fr, https://livre.ecoledubois.fr

informations. L'objectif premier d'une ontologie est de modéliser un ensemble de connaissances dans un domaine donné » (Bernard, 2004). L'architecture est au service de l'acquisition de connaissances, car, « *selon Ausubel (1968), la création de liens entre les connaissances est fondamentale dans le processus de construction de connaissances puisqu'une information ne peut devenir une connaissance tant qu'elle n'est pas reliée de façon signifiante aux connaissances antérieures d'un individu. »* (Pudelko, et al., 2004).

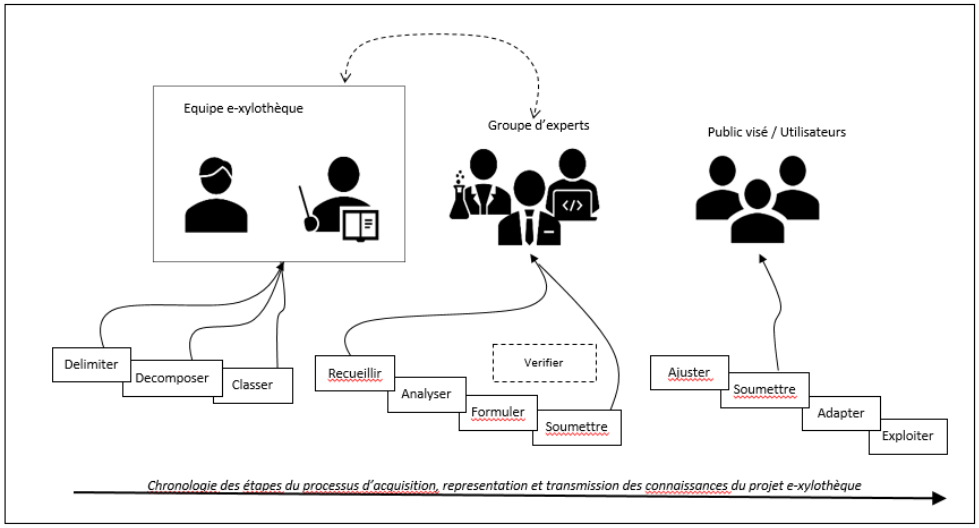


Fig 1. : Méthodologie d'acquisition et représentation des connaissances liée à la reconnaissance ou l'identification des essences de bois (adapté de Bodineau 2020)

Concrètement, il s'agit de disposer les concepts selon un arrangement unique et un langage univoque qui permette de faire le lien entre les notions évoquées.

Résultats et discussion

A ce stade, le domaine de connaissances a été délimité à la démarche pratique et pragmatique de reconnaissance et d'identification des essences, ainsi qu'aux éléments de savoirs en anatomie du bois nécessaires à la compréhension de la démarche. Un ensemble de cartes conceptuelles interconnectées entre elles de manière à obtenir un outil ergonomique et dynamique a été réalisée suite au recueil de connaissances auprès des experts, sur la base d'entretiens (Macchionni 2020, Corbineau 2020) et dans la littérature. Ce corpus décrit les processus opérationnels, les concepts. Le but est de clarifier leurs déroulés de manière à insister sur le caractère pédagogique de l'outil.

La Fig. 2 illustre l'outil qui guide l'apprenant en fonction des connaissances ou des processus qu'il souhaite mettre en œuvre. La navigation permet de suivre une démarche, d'accéder à du contenu sous diverses formes pour expliciter le vocabulaire, les notions et plus pratiquement comment effectuer la reconnaissance ou l'identification d'une essence.

La Fig. 3 permet d'illustrer le format des cartes conceptuelles et le type de contenu qui peut y être associé.

Une version beta de l'outil est constituée avec une trentaine de cartes reliées entre elles (carte conceptuelle ou carte de processus) et associées à différentes ressources numériques (fiches d'informations, liens vers des sites ou contenus en ligne, Ecole Supérieure du Bois 2020). Une phase de vérification auprès des experts est en cours, la phase d'expérimentation et de test auprès des utilisateurs (publics cibles) est programmée.

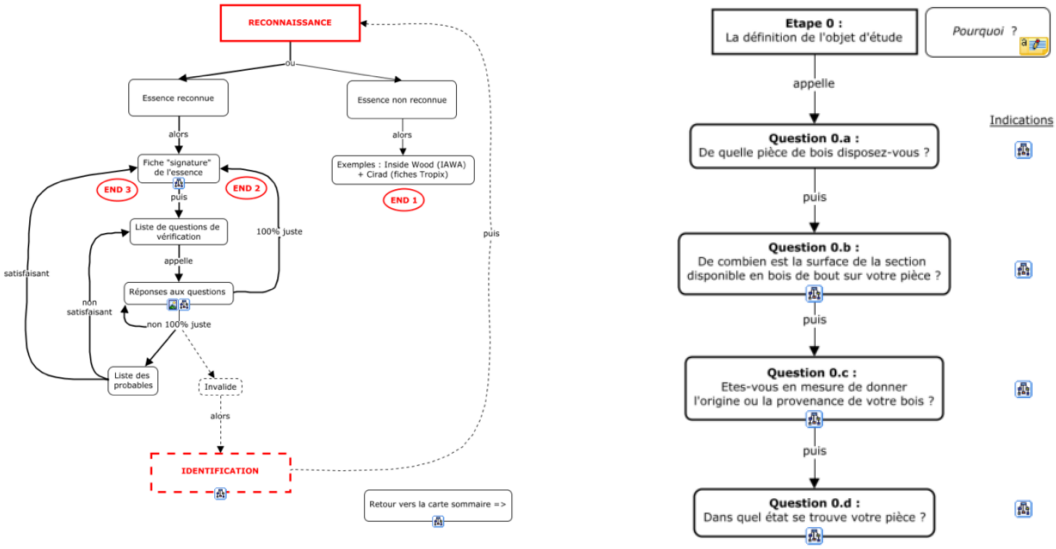


Fig. 2 : Carte globale du processus de reconnaissance associé (à droite) à la carte étape 0 de la procédure d'identification d'une essence. Illustrations du projet e-xylothèque

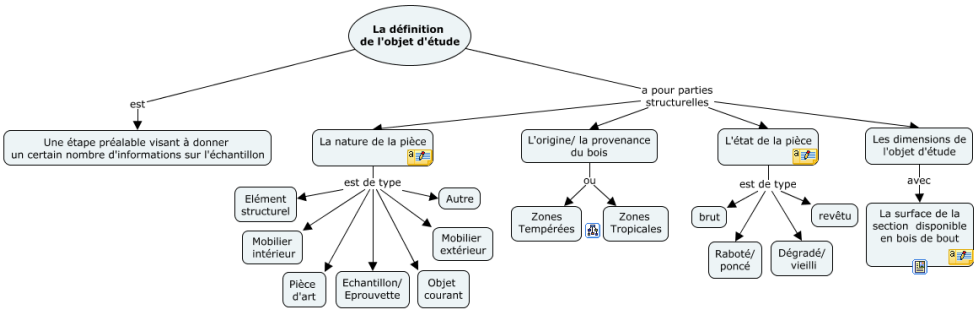


Fig. 3 : carte conceptuelle du projet e-xylothèque: définition de l'objet d'étude (Bodineau 2020)

Conclusion et perspectives

L'outil a été édité pour permettre l'apprentissage de la reconnaissance et de l'identification des essences de bois par une approche pratique et pragmatique. La représentation des connaissances, via un ensemble de cartes conceptuelles et d'une architecture, explicite et rend accessible une démarche et les savoirs qui y sont associés. Cette première étape est structurante puisqu'elle constitue le squelette d'une xylothèque numérique pédagogique. L'outil synthétise un grand nombre de connaissances et les inscrits dans une même approche opérationnelle. Le matériau bois et un référencement non exhaustif de ressources globales externes pouvant aider dans la démarche d'apprentissage sont compilés via une entrée unique.

Un groupe de travail constitué des parties prenantes du projet, s'attache désormais à :

- Tester l'outil auprès d'un panel représentatif du public cible pour ajuster l'outil en s'assurant de son efficacité, accessibilité, ergonomie.
- Compléter les contenus numériques associés à l'outil (vidéos, images interactives…).
- Finaliser un outil numérique de simulation, complémentaire, à même de guider in situ les professionnels dans l'apprentissage et l'action de reconnaissance ou d'identification d'une essence de bois. (Travaux réalisées en collaboration avec l'INRAE).

L'ensemble de ces travaux permettra à terme de réaliser un livre de connaissance électronique accessible à distance sur le domaine étudié, achevant ainsi la transposition numérique à la fois des méthodes/pratiques d'apprentissages et des outils physiques supports déployés par une communauté de spécialistes au sein de l'Ecole Supérieure du Bois ces dernières années.

Remerciements

Ces travaux sont financés par le programme de coopération CHAMPLAIN (Conseil Franco-Québecois de Coopération Universitaire) mené en collaboration avec A. ACHIM et A. CLOUTIER de l'Université LAVAL.

Références

Augustavaud. (2018) Reconnaissance des essences de bois - Clé d'identification microscopique. *Quizlet.* Plateforme pédagogique.

Bodineau M. (2020) Participation à la création d'un livre de connaissances sur la reconnaissance des essences. Rapport de stage de 2ème année de formation ingénieur de l'Ecole Supérieure du Bois, septembre 2020.

Bernard A. (2004) Ontologie (informatique) - Définition et Explications . Techno-Sciences.net. https://www.techno-science.net/apropos.html. 2269-787X.

CODIFAB (2019) Wood Species Eye. https://www.codifab.fr/actions-collectives/bois/wood-species-eye-2238.

Corbineau P. (2020) Entretien avec Paul Corbineau. privée, Nantes : Matthieu Bodineau, Juin et Juillet 2020.

Dallwitz M.J. (2020) Descriptions, illustrations, interactive identification, and information retrieval from DELTA databases. *Delta-intkey*

Ecole Supérieure du Bois (2020) Supports de cours et Fiches descriptives relatives à la formation à l'anatomie du bois et la reconnaissance des essences. Plateforme Wananga.

IWG (2005) Search the InsideWood Database. Inside Wood. Banque d'images https://insidewood.lib.ncsu.edu.

Jmal A. (2013) Représentation des connaissances scientifiques en vue de leur transfert vers l'industrie: Application à la valorisation des produits à base de bois en fin de vie. Mémoire de thèse de doctorat.

Macchioni N. (2020) Entretien avec Nicola Macchioni. privée, Nantes : M.Bodineau, Juillet et Août 2020.

Meier E. (2020) Wood Identification Guide. Wood database. Un guide en langue anglaise et disponible au format papier sur l'identification des essences de bois .

Milton N.R. (2007) Knowledge Acquisition in Practise, A Step-by-step Guide. Londres : Springer, 2007. 9781846288609.

Pudelko, B., Basque J. (2004) Logiciels de construction de cartes de connaissances : des outils pour apprendre. [Pdf en ligne]

Ruffinatto F., Castro G., Crivellaro A. (2019) MacroKey. Macroscopic Wood identification software for temperate and tropical timber species.

Trou M.C. (2015) Anatomie du Bois - Formation, fonctions et identification. La Plaine Saint-Denis : Quae, 2015. 978-2-7592-2349-7. FUN-MOOC. [En ligne] [Citation : 15 Juillet 2020.]

Venet J. (1986) Identification et classement des bois français. Nancy : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts , 1986. 2-85710-020-5

Projet Gemm_Est : le retour du gemmage dans le Grand Est

RIBEIRO Sébastien[1], COLIN Francis[1], JOLIVET Yves[1], VAULTIER Marie-Noëlle[1], CONTINI Adrien[1], GERARDIN Philippe[2], DUMARCAY Stéphane[2], LENEVEU Luc[3]

[1]UMR 1434 Silva, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, Faculté des Sciences et Technologies, BP 70239, 54506, Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France
[2]LERMaB, EA 4370 - Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, 54547, Vandœuvre-lès-Nancy, France
[3]Biogemme - Holiste, 40600, Biscarrosse, France
sebastien.ribeiro@univ-lorraine.fr

Mots clefs : résine ; gemme ; terpène ; gemmage ; résineux ; Grand Est ; chromatographie GC-MS ; pinène

Contexte et objectifs

La **résine** ou **gemme**, substance naturelle produite par de nombreux conifères, est une ressource abondante en **terpènes** (Bohlmann et Keeling 2008). Elle est récoltée en pratiquant une blessure dans le tronc des arbres au moyen d'une méthode ancestrale, le **gemmage**. Une fois collectée, la gemme brute fournit de l'essence de térébenthine et de la colophane après purification et distillation (Langenheim 2003). C'est la composition chimique de ces sous-produits qui va définir leur valeur marchande et leur utilisation finale (Rodrigues-Corrêa et al. 2013, Celedon et Bohlmann 2019). Ils seront utilisés dans la fabrication de divers produits issus des domaines de la cosmétique, de l'agroalimentaire, de la pharmaceutique et de la santé.

Dans les années 1930, la France était le deuxième producteur mondial de résine. La production de gemme française s'est ensuite effondrée en raison de l'augmentation des coûts de main-d'œuvre et de la compétitivité chinoise, jusqu'à disparaître dans les années 1990. Cependant, elle commence à se redresser depuis ces cinq dernières années grâce à l'exploitation du pin maritime en Nouvelle-Aquitaine (association 'Gemme la forêt d'Aquitaine', 2014). Avec plusieurs millions d'hectares de forêt, l'est de la France est un territoire riche en **résineux** où la pratique du gemmage pourrait être réactivée. Ceci permettrait de mieux valoriser ces essences et apporter un revenu supplémentaire aux propriétaires forestiers. De plus, le contexte sociétal est particulièrement favorable puisqu'il y a une demande croissante de biomolécules dans les produits cosmétiques, pharmaceutiques et sanitaires (projet ExtraFor_Est 2020).

A travers une approche pluridisciplinaire, l'objectif du **projet Gemm_Est** (financement Lorraine Université d'Excellence) est d'apporter des bases scientifiques et techniques pour analyser la faisabilité de la réintroduction du gemmage dans la région **Grand Est**. Ainsi, une **première campagne de gemmage** a été initiée afin de (i) tester la faisabilité de la procédure de gemmage sur les différentes essences du projet, et (ii) d'analyser la composition chimique de la résine de pin sylvestre suite à trois blessures.

Matériel et méthodes

Cinq espèces de la famille des Pinacées, le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), l'épicéa commun (*Picea abies*), le sapin blanc (*Abies alba*), le mélèze d'Europe (*Larix decidua*) et le douglas (*Pseudotsuga menziesii*) ont été gemmées. Le gemmage a été réalisé de juin à août 2020 à l'aide d'une technique innovante et respectueuse de l'environnement développée par la société **Holiste** (2018).

La procédure de gemmage a consisté en trois étapes (Fig. 1) :

- L'arbre a été blessé à l'aide d'une perceuse possédant une fraise de 7,1 cm de diamètre, pour permettre à la résine de s'écouler. La blessure prend alors le nom de pique.
- Une pâte (contenant un activateur de type acide organique naturel) a été appliquée sur la pique afin de retarder la cicatrisation de l'arbre.
- Un système de collecte de la résine, comprenant une poche de 3 litres et un raccord, a été installé sur l'arbre.

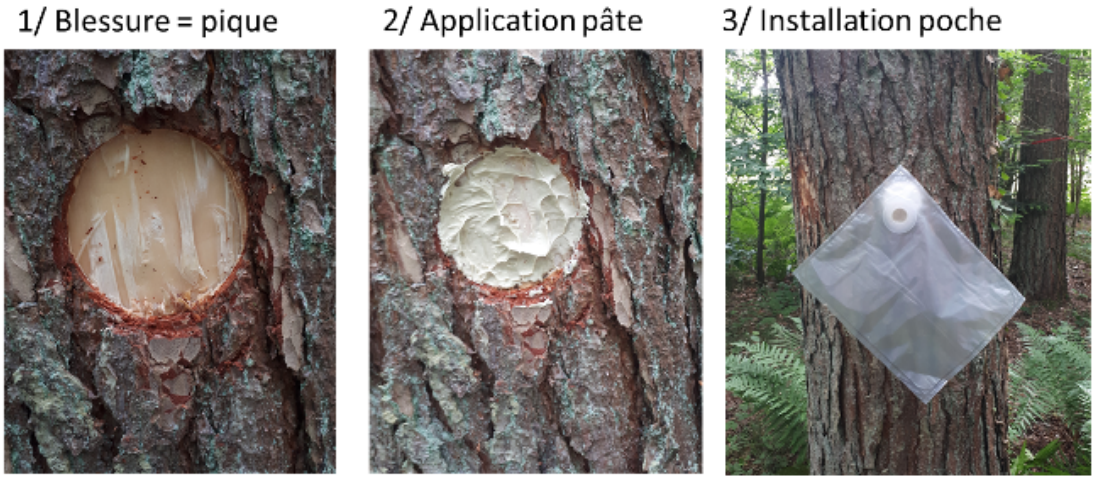


Fig. 1 : Procédure de gemmage en trois étapes, développée par la société Holiste (2018).

Chaque arbre a été blessé trois fois (trois piques différentes), avec une blessure toutes les trois semaines. Chaque nouvelle pique a été ouverte au-dessus de la précédente.

Une fois collectées, la phase solide (colophane) et la phase liquide (essence de térébenthine) de la gemme ont été séparées (Fig. 2). Pour chaque phase, 50 mg de résine ont été dilués dans 1 ml d'hexane (solution mère). La composition chimique des deux phases a été analysée par **chromatographie GC-MS** à partir d'un sous-échantillon de la solution mère dilué au 1/50.

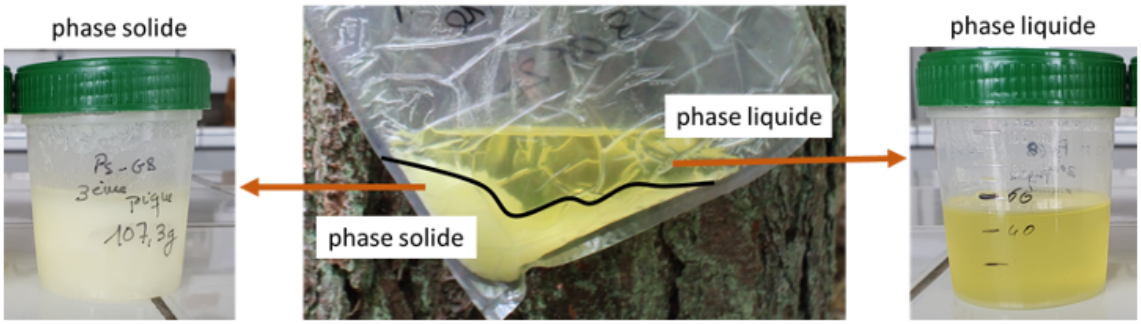


Fig. 2 : Séparation des phases solide et liquide de la gemme

Premiers résultats

Sur les cinq essences testées, seul le pin sylvestre a donné de la résine en quantité suffisante pour une potentielle exploitation dans l'est de la France. Les rendements étaient très variables d'un arbre à l'autre, allant de 30 à 479 g de résine récoltée sur toute la période de gemmage. A titre de comparaison, les rendements de la société Holiste sur le pin maritime dans les Landes sont en moyenne de 3,4 kg par arbre et par saison (5 à 7 mois, de mars à septembre). Néanmoins, la première campagne de gemmage a été décalée et réduite de moitié du fait de la crise sanitaire liée au coronavirus, et n'a ainsi pu débuter qu'en juin au lieu de mars comme initialement prévu.

Ce décalage a forcément eu un impact négatif sur les rendements annuels en résine de pin sylvestre, qu'il est impossible de quantifier actuellement.

L'analyse chimique de la gemme de pin sylvestre a montré la présence de nombreux monoterpènes, sesquiterpènes et acides résiniques diterpéniques. Les composés majoritaires sont les monoterpènes α- et β-**pinène**, constituants de certains parfums, solvants et médicaments. Même si les profils chimiques des cinq pins sylvestres étaient similaires, nous avons observés de légères variations au niveau de l'abondance des composés terpéniques. Ces différences peuvent s'expliquer par les caractéristiques intrinsèques propres à chaque arbre (âge, diamètre et hauteur par exemple).

Conclusion et perspectives

Ces résultats préliminaires ouvrent des perspectives prometteuses sur la valorisation des molécules identifiées par chromatographie et l'optimisation de l'exploitation du pin sylvestre. La méthode de gemmage utilisée (Holiste, 2018) s'intègre parfaitement aux enjeux actuels de notre société. Elle est raisonnée, les arbres peuvent être exploités sans que cela n'ait un impact significatif sur leur durabilité ou la quantité et qualité de leurs bois. Elle est respectueuse de l'homme et de l'environnement, avec une blessure circulaire limitée et n'utilisant pas d'acide sulfurique mais un activateur chimique de type acide organique naturel.

A l'horizon 2021, une deuxième campagne de gemmage viendra compléter nos résultats. Une vingtaine de pins sylvestres seront gemmés pendant quatre mois dès le mois de mars. Des études anatomique et génomique viendront en complément de l'analyse chimique.

Références

Association 'Gemme la forêt d'Aquitaine' (2014) https://www.gemme-la-foret.fr/.

Bohlmann J., Keeling C.I. (2008) Terpenoid biomaterials. Plant Journal, Vol. 54, pp. 656–669.

Celedon J.M., Bohlmann J. (2019) Oleoresin defenses in conifers: chemical diversity, terpene synthases and limitations of oleoresin defense under climate change. New Phytologist, 224(4), 1444–1463.

Holiste (2018), https://www.biogemme.holiste.com/.

Langenheim J.H. (2003) Plant resins: chemistry, evolution, ecology, and ethnobotany, No. 620.1924 L275p. Oregon, US: Timber Press.

Projet ExtraFor_Est (2017) https://www6.inrae.fr/extraforest/Le-projet-ExtraFor_Est/.

Rodrigues-Corrêa K.C. da S., de Lima J.C., Fett-Neto A.G. (2013) Pine oleoresin: tapping green chemicals, biofuels, food protection, and carbon sequestration from multipurpose trees. Food and Energy Security, 1(2), 81–93.

Rôle des extractibles de bois face à la dégradation fongique

NOËL Delphine[1], NGUYEN Duy Vuong[1], AMUSANT Nadine[2], GELHAYE Eric[1], Morel-Rouhier Mélanie[1], Sormani Rodnay[3]

[1]Université de Lorraine, INRAE, IAM UMR1136, F-54000 Nancy, France
[2]UA, AgroParisTech, UMR Ecofog, CIRAD, CNRS, INRAE, BF701, Kourou, France
[3]rodnay.sormani@univ-lorraine.fr

Mots clefs : extractibles ; *Phanerochaete chrysosporium* ; dégradation fongique ; génétique.

Contexte et objectifs

Les champignons lignolytiques sont caractérisés par leur capacité à dégrader et à utiliser les trois composants majeurs du bois que sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Cependant, les processus oxydatifs utilisés par ces champignons pour décomposer le bois génèrent une myriade de molécules potentiellement toxiques, incluant des composés appelés extractibles de bois.

Les extractibles sont des composants non structurels du bois qui peuvent être extraits par l'action de différents solvants. Ce sont des métabolites secondaires produits par la plante lors de la formation du bois. Ils donnent aux différentes essences de bois leurs couleurs, odeurs et sont en partie responsables de leur durabilité naturelle (Perrot et al. 2020). Cependant, la composition d'un bois en extractibles varie en fonction de l'espèce, selon le tissu, l'origine géographique et est dépendante de l'espèce de bois (Kebbi-Benkeder et al. 2015). Ces composés constituent généralement 2 à 8% de la biomasse du bois et certaines fois davantage dans le cas d'espèces tropicales.

Précédemment, des activités antifongiques ont été démontrées à partir d'extractibles de bois et ont été attribuées à plusieurs mécanismes (Valette et al. 2017). Conséquemment, pour faire face à l'activité antifongique des extractibles de bois et s'adapter à cet environnement toxique, les champignons lignolytiques ont développé différentes stratégies de détoxication (Morel et al. 2013).

Chez le champignon *Phanerochaete chrysosporium*, modèle d'étude pour la dégradation du bois, certains acteurs moléculaires ont été identifiés comme étant impliqués dans les processus de détoxication des extractibles (Thuillier et al. 2014, Perrot et al. 2018). Cependant, afin d'identifier de nouveaux acteurs moléculaires impliqués dans ce processus une stratégie de génétique directe a ainsi été élaborée chez le champignon *P. chrysosporium RP78*. Cette stratégie consiste en trois étapes : (i) identifier une molécule toxique, (ii) générer et cribler des mutants de *P. chrysosporium* résistants à la molécule toxique, (iii) enfin, identifier les mutations présentes chez ces mutants (Nguyen 2020). *In fine*, l'objectif est de déterminer quel est le gène muté responsable du phénotype de résistance, et ainsi d'identifier de nouveaux acteurs moléculaires impliqués dans le système de détoxication de *P. chrysosporium*.

Matériels et Méthodes

Souches fongiques

La souche *P. chrysosporium RP78* notée WT et des mutants de *P. chrysosporium RP78* résistants à des extractibles de bois de *Bagassa guianensis* (*bag1*, *bag4* and *bag31*) (Nguyen, 2020) ont été utilisés.

Bois et extractibles de bois

Des copeaux de bois de duramen de *B. guianensis* ont été obtenus auprès de la scierie Dégrad Saramaca (Kourou, French Guiana). Les copeaux de bois de *B. guianensis* ont été broyés en particules de 0.2 à 0.4mm et extraits à l'acétone par Soxhlet sur une période de 24 heures (Perrot et al. 2018). Les extractibles de bois sont ensuite conservés à -20°C.

Résultats

Inhibition de la croissance de P. chrysosporium RP78 en présence d'extractibles de bois de B. guianensis (BWE pour Bagassa Wood Extractives)

Le phénotype de croissance de *P. chrysosporium RP78* a été évalué sur une période de 3 jours en réponse à différentes concentrations de BWE et en comparaison à un milieu contrôle sans extractible de bois. Les résultats ont montré une inhibition de la croissance de *P. chrysosporium* en présence de BWE en comparaison au milieu contrôle (Fig. 1A). Ces résultats confirment ainsi les propriétés antifongiques des BWE et permettent de définir les concentrations d'extractibles appropriées pour réaliser un criblage de mutants de *P. chrysosporium* résistants aux BWE (100µg.mL^{-1}) (Nguyen, 2020).

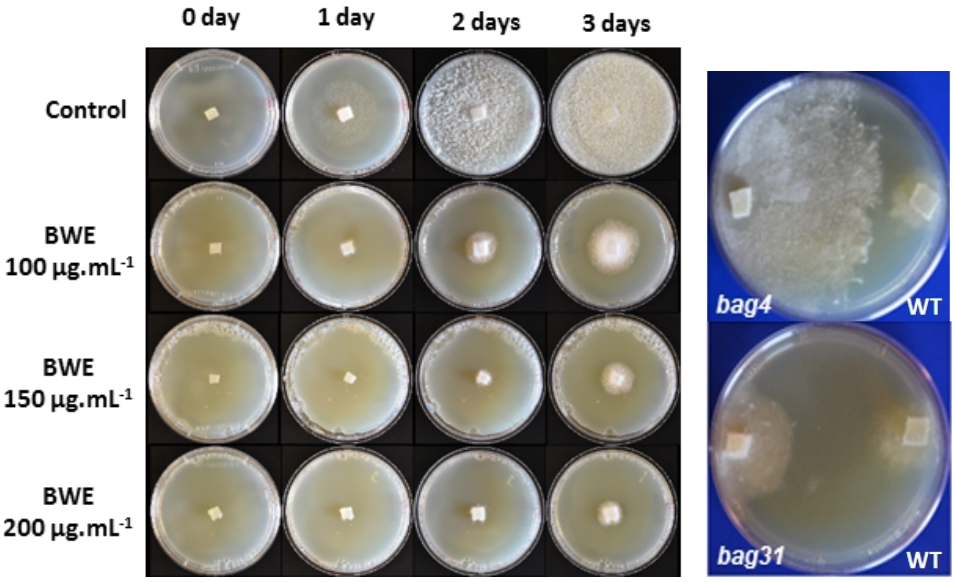


Fig.1 : Effet des BWE sur la croissance de *P. chrysosporium* WT et de mutants *bag*.
A. Inhibition de la croissance de *P. chrysosporium* WT en réponse à différentes concentrations de BWE. Un plug de mycélium de *P. chrysosporium RP78* a été inoculé sur un milieu 2% Malt-Agar (Contrôle) ou sur un milieu 2% Malt-Agar supplémenté en BWE à différentes concentrations (100 µg.mL^{-1}, 150 µg.mL^{-1}, 200 µg.mL^{-1}).
B. Phénotype de croissance des mutants *bag4* et *bag31* en comparaison au WT en réponse aux BWE (100 µg. mL^{-1}).

Isolation et caractérisation de mutants de P. chrysosporium RP78 résistants aux BWE

Une collection de 35 mutants résistants aux BWE a été générée *via* mutagenèse aléatoire aux UV suivi par un criblage sur milieu sélectif (100 µg.mL^{-1} de BWE). Cette collection de mutants a été nommée '*bag'* en référence aux BWE. La croissance des mutants *bag* a été suivie avec *P. chrysosporium* WT sur milieu sélectif (100 µg.mL^{-1} de BWE) et a montré une croissance accrue des mutants en comparaison au WT. Au sein de la collection *bag*, deux mutants, *bag4* et *bag31,* ont montré un intérêt particulier en raison de leur important phénotype de résistance en comparaison au WT (Fig. 1B) (Nguyen 2020).

La résistance aux BWE conduit à une augmentation du taux de dégradation de B. guianensis par P. chrysosporium

Les phénotypes de croissance de *P. chrysosporium* WT et du mutant *bag4* ont été observés en présence de copeaux de bois de *B. guianensis*. Après 25 jours de croissance à 37°C, une expansion de mycélium a été observée pour le mutant *bag4* contrairement au WT (Fig. 2A).

Après 2 mois de croissance à 37°C, les pertes de masse ont été déterminées pour les mutants *bag1*, *bag4* et *bag31* et ont été comparées au WT. Les résultats ont montré une perte de masse significative pour les mutants *bag4* et *bag31* en comparaison au WT (p-value de 0,041 et 0,0019 respectivement). Le mutant *bag1* a exposé également une perte de masse plus importante mais non significative en comparaison au WT (p-value de 0,157) (Fig. 2B). Ces résultats démontrent une augmentation du taux de dégradation de *B. guianensis* par des mutants résistants aux extractibles trouvés dans cette essence de bois en comparaison au WT. Ainsi, pour la première fois *in situ*, une relation entre le taux de dégradation de bois et le rôle des extractibles face à des attaques fongiques a été établie à un niveau physiologique. Cette expérience sera renouvelée avec des éprouvettes de bois suivant la norme EN 350-1 incluant de légères modifications.

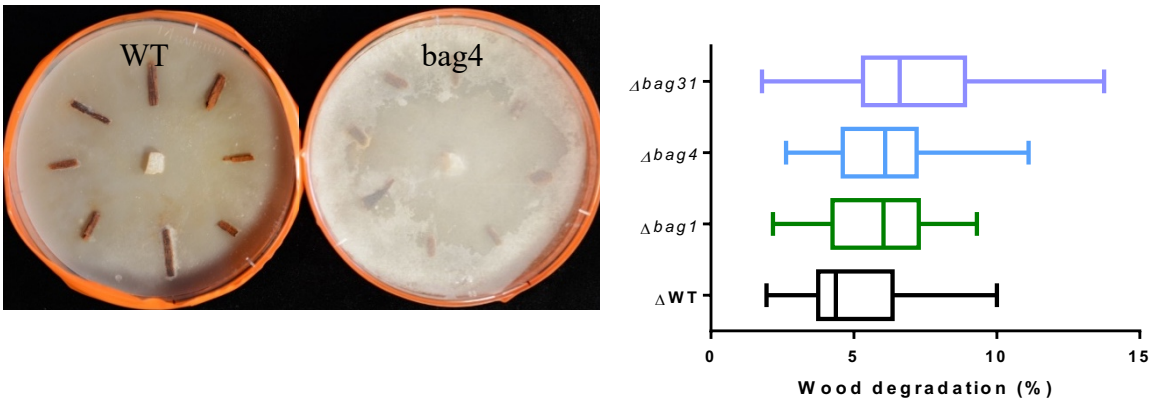


Fig.2 : Tests de dégradation de copeaux de bois de *B. guianensis* par *P. chrysosporium* WT et des mutants *bag*.

A. Phénotype de croissance de *P. chrysosporium* WT et du mutant *bag4* en présence de copeaux de bois de *B. guianensis* après 25 jours de croissance à 37°C.

B. Boîte à moustache représentant les taux de dégradation des copeaux de bois par *P. chrysosporium* WT et les mutants *bag1*, *bag4* et *bag31* après deux mois de croissance à 37°C. L'axe des abscisses représente le pourcentage de dégradation des copeaux de bois et l'axe des ordonnées représente les génotypes des individus expérimentés. Pour chaque individu, les boîtes à moustache indiquent le 1er quartile, le 3ème quartile, la médiane et la déviation standard à partir des pertes de masse enregistrées. Les pertes de masse ont été calculées à partir de 32 réplicats techniques provenant de 4 réplicats biologiques. Un astérisque fait référence à une p-value < 5% et deux astérisques à une p-value < 1%.

Conclusion et perspectives

Parmi les champignons dégradeurs de bois, *P. chrysosporium* est considéré comme un modèle pour les études portant sur la dégradation du bois. Toutefois le manque d'outils génétiques a limité son étude durant les dernières années. Afin de mieux comprendre comment et pourquoi les extractibles ont un rôle protecteur face à la dégradation fongique, la production de mutants résistants aux extractibles de bois de Bagasse a été entreprise. Il a été observé que ces mutants

dégradent mieux ce bois que des champignons sauvages. La caractérisation de ces mutants devrait ainsi nous permettre de comprendre comment et pourquoi les BWE confèrent au bois dont ils sont issus sa durabilité.

Références

Kebbi-Benkeder Z., Colin F., Dumarça S., Gérardin P. (2015) Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. Annals of Forest Science, 72(2), 277-284. https://doi.org/10.1007/s13595-014-0428-7

Morel M., Meux E., Mathieu Y., Thuillier A., Chibani K., Harvengt L., Jacquot J.-P., Gelhaye, E. (2013) Xenomic networks variability and adaptation traits in wood decaying fungi. Microbial Biotechnology, 6(3), 248-263. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12015

Nguyen D.V. (2020) Isolation and characterization of Phanerochaete chrysosporium mutants resistant to antifungal compounds. Mycology. Université de Lorraine, English. ⟨NNT : 2020LORR0045⟩. ⟨tel-02940144⟩

Perrot T., Salzet G., Amusant N., Beauchêne J., Gérardin P., Dumarçay S., Sormani R., Morel-Journel T., Gelhaye E. (2020) A reverse chemical ecology approach to explore wood natural durability. Microbial Biotechnology.

Perrot T., Schwartz M., Saiag F., Salzet G., Dumarçay S., Favier F., Gérardin P., Girardet J.-M., Sormani R., Morel-Rouhier M., Amusant N., Didierjean C., Gelhaye, E. (2018) Fungal Glutathione Transferases as Tools to Explore the Chemical Diversity of Amazonian Wood Extractives. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(10), 13078-13085. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02636

Thuillier A., Chibani K., Belli G., Herrero E., Dumarçay S., Gérardin P., Kohler A., Deroy A., Dhalleine T., Bchini R., Jacquot J.-P., Gelhaye E., Morel-Rouhier M. (2014) Transcriptomic responses of Phanerochaete chrysosporium to oak acetonic extracts: Focus on a new glutathione transferase. Applied and Environmental Microbiology, 80(20), 6316-6327. https://doi.org/10.1128/AEM.02103-14

Valette N., Perrot T., Sormani R., Gelhaye E., Morel-Rouhier M. (2017) Antifungal activities of wood extractives. Fungal Biology Reviews, 31(3), 113-123. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.01.002

Méthode optique de mesures des grandeurs physiques d'un essai de fluage

BONTEMPS Arthur[1], GODI Gael[1], MOUTOU PITTI Rostand[1,2], FOURNELY Eric[1], GRIL Joseph[1,3]
[1] Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont Ferrand, France
[2] CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
[3] Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont–Ferrand, France
arthur.bontemps@uca.fr

Mots clefs : Fissuration ; analyse d'image ; essai de fluage ; essai de flexion

Contexte et objectifs

La compréhension du comportement thermo-hygro-viscoélastique du matériau bois pour l'industrie de la filière est cruciale : fiabilité des charpentes, séchage optimisé, lutherie, etc. Ce sujet a été largement étudié depuis le début des sciences du bois. Il rend compte de phénomènes divers et complexes dont l'effet mécanosorptif, le vieillissement physique, le couplage entre la mécanique de la rupture et la température. Cependant, c'est majoritairement le comportement du bois dans le domaine hygroscopique qui a été étudié, étant donné que le séchage est quasiment systématique avant utilisation. L'étude présentée rentre dans le cadre d'une thèse dont le but est d'étudier le comportement du sapin pectiné vert ou partiellement séché afin de déterminer de nouvelles solutions technologiques s'affranchissant du séchage. Pour cela, des essais de fluage sur des poutres entaillées en bois de sapin pectiné partiellement séché et en environnement extérieur abrité seront réalisés. Les paramètres suivis seront : ouverture et longueur de fissure, flèche centrale et courbure, retrait-gonflement et teneur en eau d'équilibre. Une méthode optique est en cours de développement avec comme objectif de mesurer rapidement, à bas coût et de façon répétable des grandeurs macroscopiques à partir de l'analyse de photographies. Ce résumé et le poster associé présentent les travaux menés pour explorer et tenter de valider cette méthode.

Matériel et méthode

La méthode optique :

Elle consiste en des analyses d'images contenant des marqueurs « ArUco ». Ces marqueurs sont des carrés semblables à des QR codes, majoritairement utilisés en réalité augmentée (Fig. 1)

Fig. 1 : Illustration d'un marqueur ArUco

En imprimant puis collant plusieurs marqueurs le long d'une poutre subissant un déplacement, il est possible de suivre l'évolution de leur position sur une succession de photos. Plusieurs étapes sont nécessaires :

- La caméra utilisée doit être calibrée : une série de photos d'un damier régulier permet de déduire sa matrice de calibration. Les photos contenant les distances à mesurer sont ensuite corrigées par la calibration.

- Un script utilisant la librairie d'analyse d'image « OpenCV » analyse la photo contenant les distances à mesurer : il identifie les marqueurs présents et détermine leur position dans le domaine de la photo (pixels).
- En fournissant au programme la position physique (millimètres) de certains marqueurs, celui-ci détermine une matrice d'homographie. Cette matrice d'homographie correspond à la matrice de passage entre les positions virtuelles (pixels) et les positions physiques (millimètres) recherchées. Les marqueurs dont la position est connue forment en quelque sorte une échelle sur la photo, qu'on appelle dans ce cas une « mire ». A partir de cette matrice, la position de tous les marqueurs est calculée.
- Les positions physiques de chaque marqueur permettent de déterminer la distance entre chacun d'entre eux.

L'avantage de cette démarche est de pouvoir calculer la même distance quelle que soit la position de la caméra, tant que les marqueurs sont identifiables.

Premiers tests :

D'abord, une série de photos contenant des marqueurs ArUco sur une feuille blanche a été prise pour vérifier que les mesures correspondent bien aux distances sur la feuille en question. Chaque photo contenait une mire de référence et deux marqueurs dont la position était inconnue. Pour plus de représentativité, des photos ont été prises des jours nuageux (avec peu de luminosité) et des photos lors de journées ensoleillées. Différentes conditions d'essai sont expérimentées comme illustré sur les Fig. 2, 3 et 4. Dans chaque cas, Les marqueurs 10, 11, 12, 13 forment la mire et les marqueurs 1 et 2 sont de position inconnue.

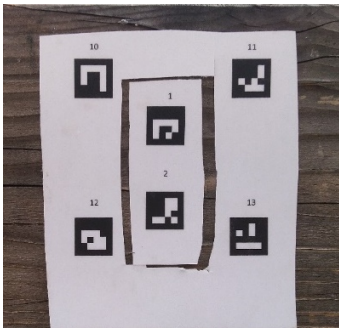


Fig. 2 : mires et marqueurs dans le même plan et sans inclinaison.

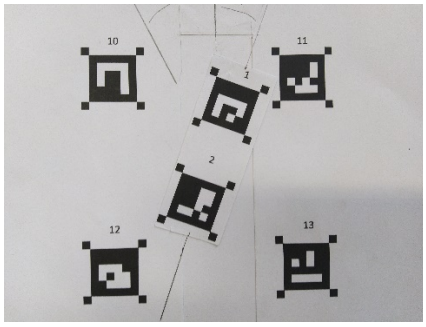


Fig. 3 : les marqueurs 1 et 2 sont inclinés par rapport à la mire

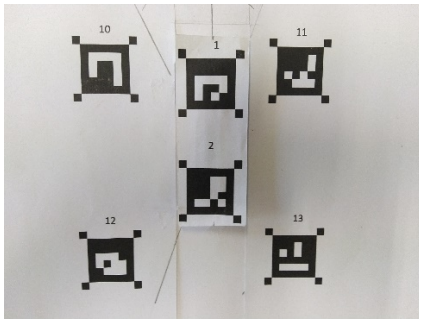


Fig. 4 : les marqueurs 1 et 2 sont dans un plan décalé de 5mm par rapport au plan de la mire.

Essai de validation :

Un essai de flexion quatre points sur une poutre entaillée contenant des marqueurs a été réalisé. L'idée est de simuler les essais de fluage longue durée (ceux en préparation) en remplaçant l'effet du temps par un déplacement imposé jusqu'à rupture. Des marqueurs étaient placés : (i) au niveau de l'entaille et le long de la poutre pour évaluer l'ouverture et la longueur de fissure, (ii) au centre pour évaluer la courbure.

Conditions de l'essai :

L'essai était piloté en déplacement. Les poutres utilisées sont de mêmes dimensions que celle de Pambou Nziengui (2019). Le montage expérimental est représenté en Fig. 5.

Afin d'éviter le poinçonnement, des plaques d'appuis de dimension 70*60*2 mm ont été utilisées.

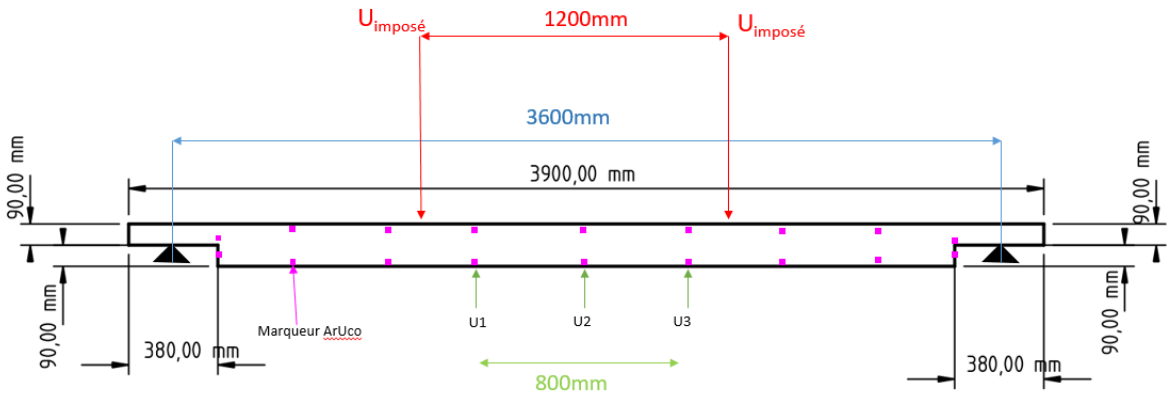


Fig. 5 : Montage expérimental de la poutre entaillée prochainement testée.

Deux mires sont utilisées : une mire « fer à cheval » en aluminium pour l'ouverture de fissure et la courbure ; puis une mire « à fente » en acier pour la longueur de fissure. La mire à fente glisse le long de la poutre et permet de se placer en pointe de fissure (visuellement, via la fente) pour mesurer sa longueur. Elles sont représentées en Fig. 6 et 7.

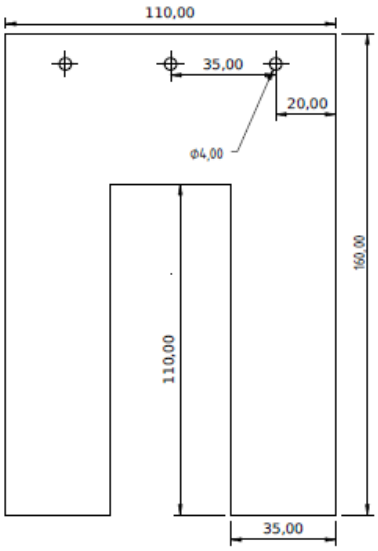


Fig.5 : Dimensions de la mire « fer à cheval »

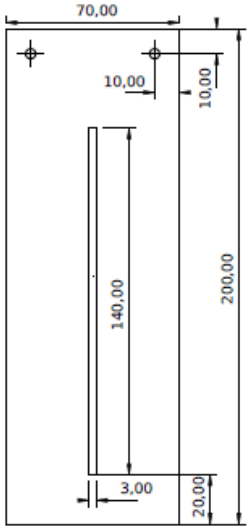


Fig.6 : Dimensions de la mire « à fente »

Enfin, pour comparer les résultats issus des analyses d'image, 3 capteurs LVDT (placés respectivement en U1, U2 et U3 sur la Fig. 5) étaient utilisés pour la mesure de courbure, les mesures d'ouverture et de longueur de fissure étaient quant à elles évaluées au réglet.

Premiers résultats

La série de photos sur feuille a permis d'estimer la précision de la méthode avec l'appareil photo d'un téléphone portable et avec un Canon EOS-1D Mark II. Les résultats montrent que :

- l'angle des marqueurs par rapport à la mire ne pose aucun problème.
- la position de la caméra, tant que les marqueurs sont identifiables, ne pose pas de problème.
- le décalage dans le plan de la mire nuit considérablement à la qualité des mesures. Par conséquent, il sera primordial que tous les marqueurs soient dans le même plan lors d'une photo.

Table 1 : Résultats des tests de photo sur feuille blanche

	Moyenne des mesures de distance sur 61 photos (distance vraie : 40mm)	Ecart-type sur 61 photos	Incertitude à 95% = 2*écart-type
Asus_X00TD	39.56 mm	0.0498 mm	0.0995 mm
Canon EOS-1D Mark II	40.014mm	0.0274mm	0.054mm

Les résultats de l'essai de flexion montrent :

- Une efficacité satisfaisante dans le cas des mesures d'ouverture et de longueur de fissure. Les marqueurs sont bien identifiés et les mesures de distances coïncident avec celles faites au réglet.
- Une mauvaise efficacité de la mesure de courbure. Le problème principal concerne l'identification des marqueurs. Ces derniers étant espacés de 50cm chacun, une photo les contenant tous les trois impose d'éloigner l'appareil photo et rend les marqueurs non identifiables. Par ailleurs les valeurs numériques sont légèrement différentes de celles obtenues avec les capteurs LVDT.
- Une nette supériorité de la qualité photo du Canon sur le téléphone portable Asus.

Conclusion et perspectives

D'après les premiers résultats de la méthode, il est possible d'anticiper que :

- La méthode de mesure optique devrait permettre de mesurer les retraits-gonflements journaliers. En effet, en se basant sur les coefficients de retrait-gonflement du sapin pectiné : α_R=0,19 et α_T=0,37%/% (Guitard 1987) sur des poutres de section 180*60 mm, une variation de teneur en eau de 1% implique une variation de hauteur d'environ 0.34 mm. L'incertitude à 95% estimée à 0.054mm est environ 6 fois plus petite. Les variations saisonnières, plus importantes, seront efficacement obtenues.
- Les déformations longitudinales de la poutre seront probablement hors de portée de la méthode. Ceci pourra être confirmé par l'essai de flexion quatre points.
- La flèche centrale serait efficacement mesurée par la méthode mais pour des raisons pratiques sera plutôt évaluée par un capteur LVDT.
- L'application de la méthode à la mesure de courbure sera de nouveau essayée mais en rapprochant les marqueurs entre eux (afin d'approcher l'appareil photo).

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Auvergne Rhône Alpes pour le financement de la thèse via le CPER ainsi que l'UCA pour le chèque recherche innovation du programme Hub Innovergne du CAP 20-25.

Références

Guitard D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites. Cépaduès. 16, 17, 52,54

Pambou Nziengui C.F., Moutou Pitti R., Gril J. Fournely E., Godi G., Ikogou S. (2019) Notched-beam creep of Douglas fir and white fir in outdoor conditions: Experimental study. Construction Material and Building. Vol 196, 659-671.

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

Etude de l'aptitude au déroulage de bois de tremble local destiné à la production de moules de cuisson

LAVALETTE Anne[1], DE BUSSAC Olivier[1], VIGUIER Joffrey[2], BUTAUD Jean-Claude[2], DENAUD Louis[2], HUBERT Antoine[3], DE LA ROCHERE Eric[3], COLINOT Alain[4], LANVIN Jean-Denis[5], BOURDIN Jérôme[6]

[1]Panibois, 3 rue des Vignes, 45240 Marcilly en Villette
[2]LaBoMaP, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Rue Porte de Paris, 71250 CLUNY
[3]Arbocentre, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, ARDON, 45075 ORLÉANS CEDEX 2
[4]CNPF Délégation Centre Val de Loire, 43 rue du Bœuf Saint Paterne – 45000 ORLEANS
[5]Institut Technologique FCBA, Allée de Boutaut BP 228 - 33028 Bordeaux Cedex
[6]Boulangerie RDV Gourmand, 187 Rue du 11 Novembre 1918, 45590 Saint-Cyr-en-Val
anne.lavalette@panibois.com

Mots clefs : bois déroulé ; *Populus tremula* ; moules de cuisson

Contexte et objectifs

Le tremble, *Populus tremula L.,* est une essence présente sur le territoire français mais sa répartition, sa disponibilité par types de propriétés et la qualité de son bois ne sont pas suffisamment connues pour valider ou rejeter son utilisation en bois déroulé pour la fabrication de moules de cuisson. Pourtant, l'utilisation de cette ressource française résoudrait des problèmes d'approvisionnement en matière première et réduirait les importations de tremble de Russie, ressource actuellement utilisée par l'entreprise Panibois. En effet, les critères de qualité du bois utilisé pour la production de moules de cuisson sont très sévères et malgré divers essais d'approvisionnements en France, aucune filière n'a été développée aujourd'hui. La tension sur le peuplier (actuelle et à venir) rend l'étude sur le tremble d'autant plus nécessaire au sein de la filière « emballage léger ». Le transport de bois déroulé en provenance de Russie se fait en camions frigorifiques afin d'éviter la détérioration du bois utilisé à l'état vert. Un approvisionnement plus proche permettrait des transports plus conventionnels et ayant moins d'impact sur l'environnement tout en valorisant la ressource locale.

L'objectif de ce projet est par conséquent d'étudier cette ressource locale et sa capacité à répondre aux exigences de fabrication de moules de cuisson en alternative au tremble d'origine russe (aux qualités reconnues pour ce procédé).

Matériel et méthode

Le matériel étudié est constitué de 12 billes de pied de 2,40 m de long, issues de trois lots de bois. Les lots sont sélectionnés sur des stations forestières différentes, pour prendre en compte l'effet du sol sur la qualité du bois. Des arbres de diamètres compris entre 0,30 et 0,50 m sont sélectionnés avec des arbres de petits et de gros diamètres dans chaque lot pour évaluer l'effet de ce paramètre sur la qualité du déroulage. Le Tab. 1 regroupe les individus prélevés.

Chaque bille de 2,40 m est recoupée en 3 billons de 0,8 m pour le déroulage. Au total, 36 billons de 0,8 m ont été déroulés.

L'étude comporte trois étapes. Au cours de la première étape, une partie des billons a été utilisée pour la recherche des paramètres de déroulage (vitesse, pression, angle de coupe etc.) les plus adaptés à la fabrication de placage de 1,2 mm d'épaisseur.

Tab. 1 : Echantillonnage

Lot	Station forestière	Bille	Diamètre (cm)	Date d'exploitation	Date de déroulage
1	Vienne en Val – Grande Sologne. Station humide à nappe perchée, type 11 (peu favorable à la production forestière)	C	39	28/02/2020	2 et 3 mars 2020
		D	32		
		F	49		
		I	48		
2	Boigny sur Bionne – Orléanais. Station fraiche, humide (assez favorable à la production forestière)	U	32	20/03/2020 sauf bille U : 1/03	27 et 28 mai 2020
		X	34		
		Y	36		
		Z	50		
3	Saint-Jean-les-deux-Jumeaux – Plateau de Brie. Station de type 7, limon profond frais en permanence (très favorable à la prod. forestière)	1	45	30/06/2020	8 et 9 juillet 2020
		3	40		
		4	34		
		5	37		

Dans un second temps, les paramètres issus de l'étape 1 ont été utilisés pour le déroulage des autres billons. Les feuilles issues du déroulage ont été découpées au format de 216 x 315 x 1,2 mm (produit Panibois). La qualité des placages été évaluée en prenant en compte la couleur, l'odeur et le peluchage des bois, qui sont les paramètres d'intérêt de l'entreprise Panibois.

Enfin, les produits déroulés et mis à format ont été testés en conditions réelles. La tenue mécanique des placages lors de la fabrication des moules de cuisson et lors de la cuisson en four de boulanger a été particulièrement observée.

Résultats et discussion

Etape 1 : paramètres de déroulage

La vitesse de déroulage a été fixée à 1,5 m/s pour l'ensemble de la campagne d'essais. Usuellement dans le cas du peuplier une vitesse plus élevée doit limiter le peluchage, cependant une vitesse plus élevée sur la dérouleuse instrumentée du laboratoire peut engendrer un risque de mauvais empilage. Il est de plus reconnu que dans la gamme de vitesse de déroulage possible (vitesse maximale de 3 m/s) ce facteur est d'un ordre secondaire par rapport aux autres paramètres du procédé (Thibaut, 1988). L'angle de dépouille choisi est fixé à 2° pour des diamètres supérieurs à 150 mm puis varie linéairement jusqu'à 1,5° jusqu'au diamètre de 50 mm. Cette variation linéaire est nécessaire pour conserver une surface de talonnage quasi constante lors du déroulage. Cet angle de dépouille assez fort (limite physique à 3° sur la dérouleuse du laboratoire) est nécessaire dans le cas du déroulage en faible épaisseur afin de limiter les risques de refus de coupe. La pression appliquée via la barre de pression sur le billon a été ajustée selon la souplesse du placage estimée par flexion manuelle pour se rapprocher de celle appréhendée sur les produits habituellement mis en œuvre par Panibois. Sur l'ensemble de la campagne cette pression a peu variée : 15% en général et plus proche de 10% pour quelques billons afin d'atténuer un phénomène vibratoire qui reste encore à investiguer.

Ces différents paramètres ont été optimisés sur la base de l'analyse des efforts de coupe mesurés sur le couteau. La dérouleuse instrumentée du LaBoMaP permet cette mesure via l'utilisation de 4 cellules piézo-électriques. L'enregistrement type d'un relevé des efforts est présenté sur la Fig. 1. L'enjeu est d'avoir un phénomène le plus stable possible sur l'ensemble du billon.

L'effort horizontal sur le couteau représenté négativement sur la courbe correspond à une « plongée de l'outil », en d'autres termes le couteau est tiré vers le centre du billon. C'est la situation recherchée, propice à garantir la stabilité du procédé, en opposition à un refus de coupe qui se traduirait par un effort représenté positif (le billon repousse le couteau) qui mène à de potentielles instabilités.

Au final les paramètres choisis sont très proches de ceux employés pour le peuplier et le seul problème rencontré lors des différentes campagnes est celui du refus de coupe survenant sur des billons pelucheux. Enfin, les efforts de coupe moyens relevés ne sont pas apparus significativement différents sur les trois campagnes. Seule une hétérogénéité apparente plus forte sur les billons du premier lot a été observée.

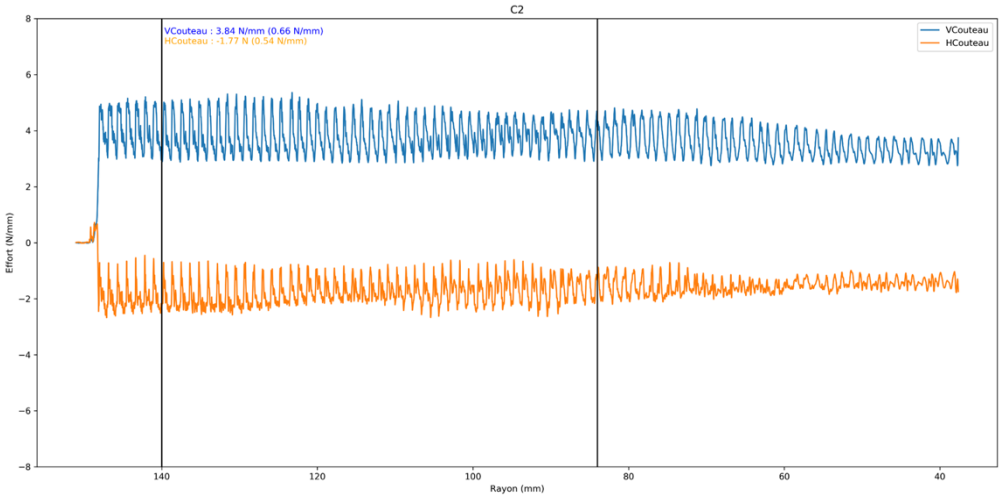


Fig. 1 : Relevé des efforts de coupe lors du déroulage d'un billon. Sont représentés en bleu l'effort vertical mesuré sur le couteau et en orange l'effort horizontal sur le couteau.

Etape 2 : Evaluation de la qualité du placage

Lors du déroulage des bois, les feuilles ont été triées en produits acceptables pour Panibois et en rebuts. Les nœuds, les feuilles fendues, ondulées (Fig. 2) et le bois pelucheux ont été les principales causes de rebuts.

Fig. 2 : exemple de bois ondulé

Le rendement global de la production a été de 34% tous lots confondus. Cette valeur est entachée de différents biais. Le premier concerne l'opération de centrage des billons lors de leur chargement. Cette opération est réalisée à la main, les rendements atteignables avec un centreur automatique industriel seraient probablement meilleurs (qualité du centrage et répétabilité). Le rendement global de la production passe à 46% après l'opération de mise au rond. De plus deux autres paramètres d'ordre pratique viennent aussi fausser ce rendement, la longueur initiale de 750 mm des billons pour réaliser deux produits de 315 mm est excessive, la longueur de billonnage aurait pu être réduite à environ 680 mm. Enfin la largeur de massicotage a elle aussi été choisie de manière à faciliter l'opération de mise à format (réalisée

à la scie circulaire sur table), une bande d'environ 5 cm de placage a été perdu sur chaque feuille déroulée.

La couleur a été observée visuellement. L'aubier est clair, le bois de cœur variable, de blanc à rouge, mais dans une gamme acceptable pour Panibois (Fig. 3 et 4).

Fig. 3 : bois de couleur homogène

Fig. 4 : aubier clair, cœur rouge

Fig. 5 : Moules après cuisson en four boulanger. Temps de cuisson : 24 min. T°C entrée : 254°C / T°C sortie : 266°C

Aucune odeur pénalisante n'a été relevée, excepté sur deux billons dont les cœurs présentaient des défauts (témoins d'une attaque biologique antérieure).

Etape 3 : Test du produit en conditions réelles

97% des bois sélectionnés ont permis la fabrication de moules de cuisson, ce qui représente un bon rendement. Les 3% restants sont dus principalement à la présence de nœuds, de casse pendant le process de transformation.

Lors des essais de cuisson en boulangerie, aucune odeur n'a été pénalisante et une très faible coloration des bois a été notée (Fig. 5). La tenue mécanique a également montré de bons résultats.

Conclusion et perspectives

Au cours de cette étude, le bois de tremble a répondu aux attentes qualitatives nécessaires à la fabrication et l'utilisation des moules de cuisson. Les paramètres de déroulage sont proches de ceux du peuplier. Cette étude reste à approfondir cependant avec des essais complémentaires sur un plus grand volume de trembles. Elle pourrrait permettre de développer un nouveau débouché pour une ressource existante localement mais peu valorisée aujourd'hui. La mise en place d'un partenariat avec un industriel français fait également partie des perspectives intéressantes pour la suite de ce projet.

Remerciements

Cette étude est menée dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt « accompagner les projets territoriaux autour de la filière forêt-bois » co-financé par la DRAAF. Nous remercions aussi l'INRAe Val de Loire, Unité BioforA pour leur participation à ce projet.

Références

Thibaut B. (1988) Le processus de coupe du bois par déroulage [Machining wood by Peeling Process] Doctorat d'Etat, Université des sciences et techniques du Languedoc.

Fissuration des rondelles de bois verts tropicaux soumises au séchage naturel : cas du Padouk et de l'Okoumé du Gabon

NKENE MEZUI Estelle[1], MOUTOU PITTI Rostand[2, 4], PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman[2, 3], IKOGOU Samuel[3], EKOMY ANGO Serge[4], TALLA Pierre Kisito[5]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), LaReVaBois, Libreville, Gabon
[2]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, 63000 Clermont Ferrand, France
[3]Ecole Polytechnique de Masuku (EPM-USTM), Gabon
[4]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
[5]Université de Dschang, Cameroun
esthernkenemezui@gmail.com

Mots clefs : Rondelle ; Bois vert ; Dessiccation ; Déformations ; Teneur en eau ; PSF ; analyse d'images

Contexte et objectifs

Grâce à ses propriétés mécaniques et à ses avantages environnementaux, le bois est de nos jours l'un des matériaux les plus utilisés dans la construction. Son comportement mécanique dépend fortement de la température, de la teneur en eau, de la géométrie de la pièce, ainsi que de son hygroscopie. Sur la base de ces informations, il apparaît qu'il soit indispensable d'étudier le comportement du bois lors du processus de séchage pour prévenir les déformations éventuelles préjudiciables à la structure. Malheureusement, la littérature montre que très peu d'études ont été faites sur le comportement des rondelles de bois vert pendant le séchage. Ce manque de données est plus important pour les essences tropicales que pour les essences tempérées. Toutefois, on dénombre quelques rares travaux effectués sur des rondelles de bois, notamment les travaux de (Moutou 2013, Ndong 2015) respectivement sur le Pin sylvestre et l'Okoumé. Les résultats issus de leurs différentes études ont permis de mettre en évidence les Points de Saturation des Fibres (PSF) des rondelles étudiées, de quantifier l'importance des déformations dans des zones spécifiques et en fonction de certains paramètres (teneur en eau, distance au centre…), etc. L'objectif général de ce travail est d'analyser le comportement hydromécanique des rondelles de bois verts soumises à la dessiccation de deux essences tropicales africaines : l'Okoumé (*Aucoumea klaineana P.*) et le Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Les objectifs spécifiques sont d'identifier les zones potentielles d'apparition des fissures, de comparer les résultats des déformations expérimentaux et numériques inter-essences, afin d'anticiper ces phénomènes et de limiter les pertes lors des différentes transformations du bois.

Matériel et méthode

Le matériel végétal nécessaire à notre étude a été prélevé dans la forêt classée de la Mondah située au cap-estérias, à l'aide d'une tronçonneuse. Les échantillons prélevés ont ensuite été usinés sous forme de rondelle, en réalisant un méplat afin de permettre une auto-stabilité des éprouvettes sur le support des essais. Les éprouvettes obtenues avaient pour dimensions moyennes, un diamètre de 24,5 ± 0,6 cm et 3,7 ± 0,27 cm d'épaisseur. Elles ont ensuite été conservées dans de l'eau, afin de les maintenir à l'état vert et d'éviter leur fissuration précoce. Les Fig. 1 et 2 ci-dessous présentent la disposition des cibles sur les surfaces des rondelles, ainsi que le dispositif expérimental. Une fois sorties de l'eau, des cibles espacées dans le sens radial de 2 à 3 centimètres ont été marquées sur les surfaces des rondelles, formant entre elles

des rayons R_i écartés d'un angle θ et des couronnes C_i. La rondelle verte est ensuite placée face à l'appareil photo à une distance d'environ 30 centimètres.

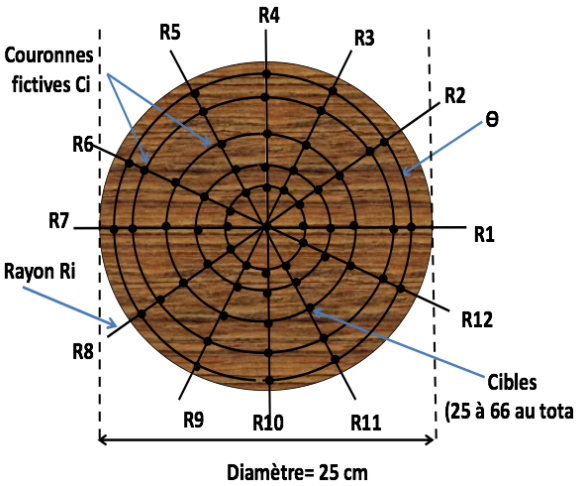


Fig. 1 : Disposition des cibles sur la rondelle

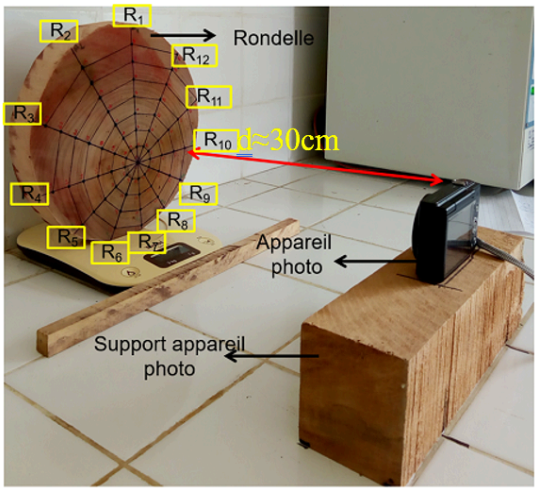


Fig. 2 : Dispositif expérimental de l'étude

La méthodologie de travail consiste dans un premier temps à prendre des captures d'images à l'aide de l'appareil photo et à prélever la température T et l'humidité relative HR de l'air ambiant avec un thermo-hygromètre, toutes les 2 heures à cause du nombre d'essais effectué simultanément, et chaque 1 heure pour l'essai 1 d'Okoumé. Nous avons ensuite mesuré la perte de masse sur une éprouvette témoin à l'aide d'une balance adaptée et mesurer les déplacements des cibles directement sur la rondelle testée et ensuite sur les images avec une règle graduée, aux mêmes fréquences horaires. Nous avons au total effectué 6 essais, dont 3 essais d'Okoumé et 3 essais de Padouk. Parmi les 3 rondelles d'Okoumé, deux se sont fissurées durant les essais (Fig. 3), contre aucune pour le Padouk.

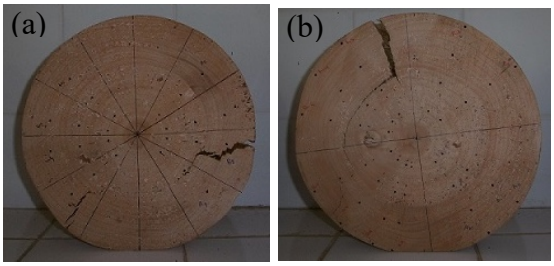


Fig. 3 : Rondelles d'Okoumé fissurées : (a) no 2 ; (b) no 3

Résultats et discussions

Ce travail a été réalisé suivant deux études distinctes : une étude dite expérimentale et une autre dite numérique. L'étude expérimentale a consisté à suivre l'évolution des déformations dans le temps grâce à un appareil photo et l'étude numérique sur cast3m avait pour objectif de simuler grâce aux résultats expérimentaux obtenus, l'évolution des déformations dans le temps en fonction de l'humidité.

Partie expérimentale

Pour la partie expérimentale, nous nous contentons ici de présenter quelques résultats des déformations radiales en fonction de la teneur en eau et leurs moyennes dans le temps. L'objectif de cette partie est d'identifier les Points de Saturation des Fibres (PSF) des rondelles d'Okoumé et du Padouk étudiées et de quantifier l'importance des déformations avant et après

ces derniers. Il s'agit également de les quantifier dans le temps, et de montrer l'impact de la fissure sur ces dernières.

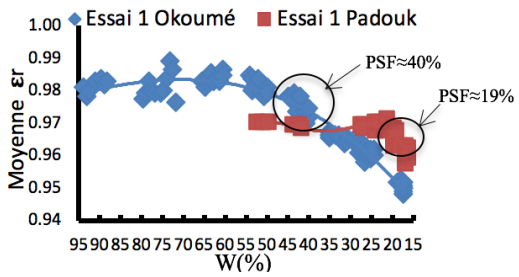


Fig. 4 : moyenne des déformations radiales en fonction de la teneur en eau

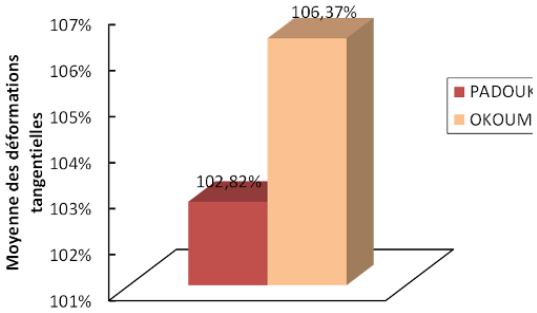


Fig. 5 : moyennes des déformations tangentielles dans le temps

Le PSF (Tab. 1) correspond ici au pourcentage de teneur en eau (noté W%) en deçà duquel les déformations augmentent de manière considérable, symbolisé par un changement d'évolution (croissance ou décroissance) de la courbe. Les Fig. 4 et 5 montrent que les déformations radiales sont négligeables avant d'atteindre les différents PSF, et elles augmentent de façon considérable sous ces derniers. De plus (Fig. 5), les déformations sont plus importantes chez l'Okoumé à cause de l'action de la fissure. On note un écart plus important entre le PSF moyen et l'humidité d'équilibre moyenne (notée $W_{éq.moyen}$) des trois essais chez l'Okoumé soit environ 21%, contre seulement 7% pour le Padouk, le PSF du Padouk étant plus faible que celui de l'Okoumé.

Tab. 1 : Écart entre PSF et humidité d'équilibre de chaque essence

Essences	PSF_{moyen}(%)	$W_{éq.moyen}$(%)	$Écart_{PSF-Wéq}$(%)
OKOUME	39	18	21
PADOUK	22	15	7

Partie numérique

Pour la modélisation numérique sous le logiciel par éléments finis Cast3m, nous avons au préalable déterminé les paramètres d'entrée que sont les constantes élastiques et coefficients de Poisson à l'aide des équations de Guitard (1987) et des corrections en humidité W et en température T de Palka (1973). Nous avons ensuite déterminé les coefficients de retrait à l'aide de la proposition de Preziosa et al. (1986). Les Tab. 2 et 3, montrant les moyennes des résultats obtenus pour les teneurs en eau finales (notée W_f), mettent en exergue l'anisotropie prononcée du matériau bois. On peut observer du Tab. 2 que les modules élastiques dans le sens longitudinal (E_L) sont cohérents avec les valeurs couramment proposées par le CIRAD (2012) tant pour le Padouk que pour l'Okoumé. Le Tab. 3 montre que le retrait longitudinal (α_L) est presque nul, ce qui confirme que les variations dimensionnelles dans le sens des fibres sont négligeables. De plus, on note un retrait important pour l'Okoumé et faible pour le Padouk.

Tab. 2 : Constantes élastiques à W_f

	Teneur en eau moy. Wf	ER=C11 (GPa)	ET=C22 (GPa)	EL=C33 (GPa)	GRT=C66 (GPa)	ρ (kg/m3)
Okoumé	18%	1,264 ±0,159	0,689 ±0,107	10,378 ±0,688	0,241 ±0,037	360
Padouk	15%	1,490 ±0,097	0,769 ±0,042	14,200 ±0,966	0,269 ±0,014	630

Les déformations radiales expérimentales et numériques de l'Okoumé dans le domaine hygroscopique (w=17,78%) se rapprochent, sauf aux couronnes 3 et 4 correspondant aux rayons

0,09 m et 0,12 m en allant vers la périphérie, à cause de l'impact de la fissure (Fig. 6a). Dans le cas du Padouk, elles se rapprochent, sauf à la couronne 3, à cause des bruts de mesures expérimentaux et des insuffisances du modèle numérique (Fig. 6b).

Tab. 3 : Coefficients de retrait entre le PSF et W_f

	β (MPa/%W)	α_R	α_T	α_L
Okoumé	2,047	0,52±0,13	0,73±0,20	0,003±0,001
Padouk	7,217	0,14±0,09	0,19±0,135	0,001

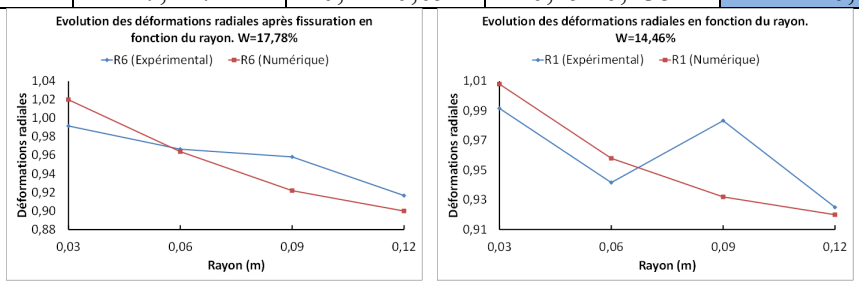


Fig. 6 : Déformations radiales : (a) Okoumé, rayon R6 ; (b) Padouk, rayon R1

Conclusion et perspectives

De cette étude, nous avons pu déterminer les PSF de nos rondelles, l'importance des déformations radiales en fonction de la teneur en eau, l'impact de la fissure sur la moyenne des déformations tangentielles dans le temps, comparer le retrait et les déformations entre l'Okoumé et le Padouk. Nous avons en plus comparé les résultats expérimentaux et numériques des déformations radiales, en faisant varier quelques paramètres dans le modèle (champ hydrique, coefficients de retrait et constantes élastiques). Pour la suite, il serait souhaitable d'avoir un dispositif expérimental plus rigoureux, afin de réduire les erreurs d'expérimentation. De plus, pour mieux nous rapprocher de la réalité expérimentale, il serait intéressant d'incorporer dans le modèle numérique l'évolution des paramètres d'entrée au cours du temps.

Remerciements

Les auteurs remercient les laboratoires de l'Institut de Recherche Technologique (IRT) et l'Institut de Recherche en Écologie Tropicale (IRET) de Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST_GABON) pour l'accueil et l'aide logistique.

Références

Cirad. (2012) Tropix 7 -1998-2011, fiche essence.

Guitard D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites, in : Coll. Nabla, Cépadues Editions, Toulouse, 228.

Moutou Pitti R., Dubois F., Sauvat N., Fournely E. (2013) Strain analysis in dried green wood: Experimentation and modelling approaches. Engineering Fracture Mechanics, 105: 182-199.

Ndong Lemey. (2015) Fissuration des rondelles de bois verts d'Okoumé soumises au séchage naturel, Mémoire de Master 2, Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Gabon.

Palka L.C. (1973) Predicting the effect of specific gravity, moisture content, temperature and strain rate on the elastic properties of softwoods, Wood Science and Technology, 7:127-41.

Preziosa C., Guitard D., Sales C. (1986) Contraintes internes dans le matériau bois : le tenseur des coefficients de contrainte de séchage comme caractéristique isotrope de la matière ligneuse, Bois et Forêt des Tropiques, Cahiers Scientifiques nº8, p. 93-109.

Modélisation en grands déplacements du comportement mécanique d'une tige lors d'un essai de flexion sur pied

ENGONGA EDZANG Arnauld[1,2], GRIL Joseph[1,2], MOUTOU PITTI Rostand[1,3], BADEL Eric[2]

[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France
[2]Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont–Ferrand, France
[3]CENAREST, IRT, Libreville, Gabon
a-clauvy_s.engonga_edzang@etu.uca.fr

Mots clefs : Essai de flexion, grand déplacement, modélisation

Contexte et objectif

La casse au vent des hévéas de plantation est un phénomène majeur pour la production de latex. Elle limite l'extension des zones de culture de l'hévéa et génère de grosses pertes de production. L'importance de ce problème de casse au vent est identifiée depuis longtemps par les sélectionneurs et par les planteurs (Nicolas et al, 1977). Elle a conduit principalement à deux méthodes de mitigation notamment, le retard d'exploitation (souvent d'une année) et la sélection empirique de clones qui semblent plus résistants à la casse au vent. L'efficacité de ces méthodes est toutefois réduite par le manque de méthodes solides d'évaluation de la performance de résistance atteinte. L'un des objectifs du projet **Vent-Debout Hévéa 1** est donc de venir en appui à ces méthodes, à travers la caractérisation de la résistance à la flexion de deux clones d'hévéa.

Les hévéas en plantation, comme tous les arbres sur pied sont des structures très élancées et essentiellement sollicitées en flexion par le vent. A ce titre, les arboristes de l'arbre en ville ont mis au point des tests de flexion sur pied pour élaborer des diagnostics de sécurité qui permettent de caractériser la rigidité de flexion de la tige (Sterken. 2018, Halford et al. 2008).

Du fait de l'élancement de l'arbre, on peut s'attendre à un déplacement important de la structure, couplé à des effets non linéaires liés au déplacement du poids propre de la tige et son houppier. Dès lors, il convient d'en tenir compte dans l'analyse des données de l'essais ; ce qui n'est actuellement pas le cas dans les protocoles élaborés par les arboristes.

L'objectif de ce travail est donc de voir dans quelle mesure la prise en compte de grands déplacements permet une meilleure interprétation des données d'essai de flexion de l'arbre sur pied.

Objet d'étude et méthodes

On se place dans le cas très particulier des clones d'hévéas en plantation qui ont une forme courbée dans la direction des vents dominants (Fig. 1a). On fait l'hypothèse que l'arbre initialement droit s'est incliné d'un angle θ_0 à la suite d'un coup de vent (état intermédiaire). Puis, du fait du moment de flexion exercé par la masse du tronc et du houppier, l'arbre s'est courbé pour arriver finalement une configuration que l'on va appeler état 0 (Fig. 1b).

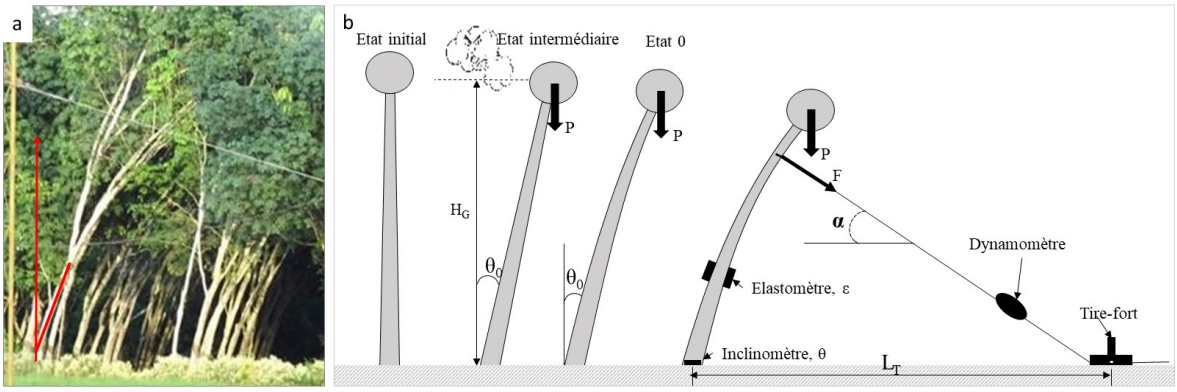


Fig. 1 : (a) Forme d'hévéas en plantation. (b) Processus d'inclinaison de l'arbre avant essai de flexion : θ_0 est l'inclinaison initiale de la base de l'arbre, la mesure de l'inclinaison θ permettant de tenir compte d'une éventuelle rotation du système en cours d'essai, ε la déformation longitudinale du tronc mesurée par les élastomètres, α l'angle du câble avec l'horizontale

La tige de l'arbre est assimilée à une poutre droite de section circulaire, avec un défilement conique jusqu'au centre de gravité du houppier G_N. Son module d'Young longitudinal E est supposé homogène. La masse du houppier est uniformément repartie autour de l'axe du tronc (pas d'asymétrie du tronc) et concentrée au point G_N (centre de gravité du houppier) situé à une hauteur $H_G = (H - H_c)/2$; H étant la hauteur totale de l'arbre et H_c la hauteur à la base du houppier.

On considère que la tige est discrétisée par des nœud $b_i = (x_i, z_i)$ sur lesquels sont concentrés les masses m_i (i∈[1 ; N]) de la tige. L'élément situé entre les nœuds b_{i-1} et b_i de longueur ds_i est représenté par son centre de gravité $G_i = (X_i, Z_i)$ (Fig. 2).

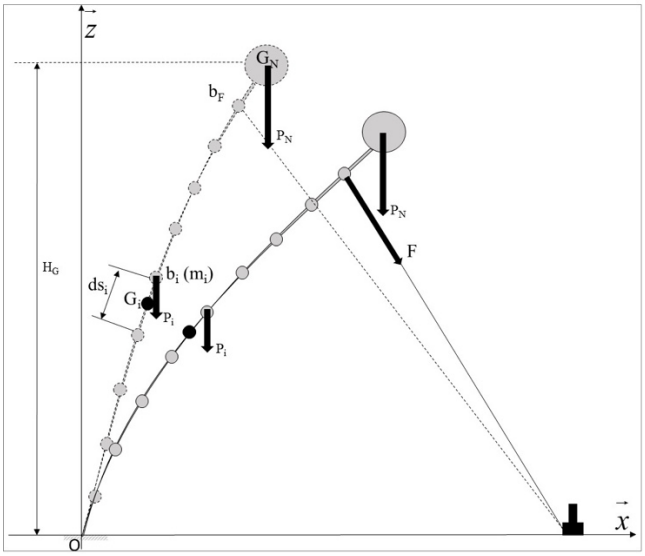


Fig. 2 : Discrétisation du problème. G_N est la position du centre de masse du houppier situé à la hauteur H_G, b_F est le point d'application de la force, m_i est la masse au nœud b_i, ds_i est la longueur de l'élément de centre G_i situé entre les nœuds b_i et b_{i-1}

Le moment total $\mathcal{M}P_i$ subit par l'élément i dû au déplacement des masses situées au-dessus est donné par :

$$\mathcal{M}\,P_i = \sum_{j \geq i} m_j g \cdot (x_j - X_i) \tag{1}$$

où g est l'accélération de la pesanteur. La flexion de la tige est effectuée sur l'arbre à l'état 0 comme le montre la Fig. 2. Si on nomme $b_F = (x_F, z_F)$, le nœud où est appliquée la force F, le moment fléchissant créé par cette force sur l'élément G_j est alors :

$$\mathcal{M}F_i = F\left[(x_F - X_i)\sin(\alpha) + (z_F - Z_i)\cos(\alpha)\right] \quad (2)$$

avec α, l'angle du câble avec l'axe horizontal. Le moment $\mathcal{M}_i$ subi par un élément i à chaque étape de l'essai est alors la somme du moment dû à l'application de la force F et du moment dû au déplacement des masses au-dessus de cet élément. La théorie de la RDM nous informe que lorsqu'un élément curviligne (plan) de longueur ds_i est soumis à un moment $\mathcal{M}_i$, sa section tourne par rapport à sa section initiale d'un angle $d\omega_i$ proportionnel au produit de $\mathcal{M}_i$ par ds_i :

$$d\omega_i = \frac{1}{E_i I_i}\mathcal{M}_i \cdot ds_i \quad (3)$$

En appliquant la méthode d'approximation de Newton à (3), on détermine la rotation de la section aux différents nœuds permettant de reconstruire la nouvelle configuration de l'arbre.

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta s_i \times \frac{\mathcal{M}_i}{E_i I_i} \quad (4)$$

Résultats

La Fig. 3a présente les différentes configurations possibles de l'arbre. Elle montre notamment la configuration initiale de l'arbre sous l'effet du poids du tronc et du houppier, et la configuration de l'arbre sous l'action d'une force (selon qu'elle soit dans la direction de la courbure de l'arbre ou dans la direction opposée).

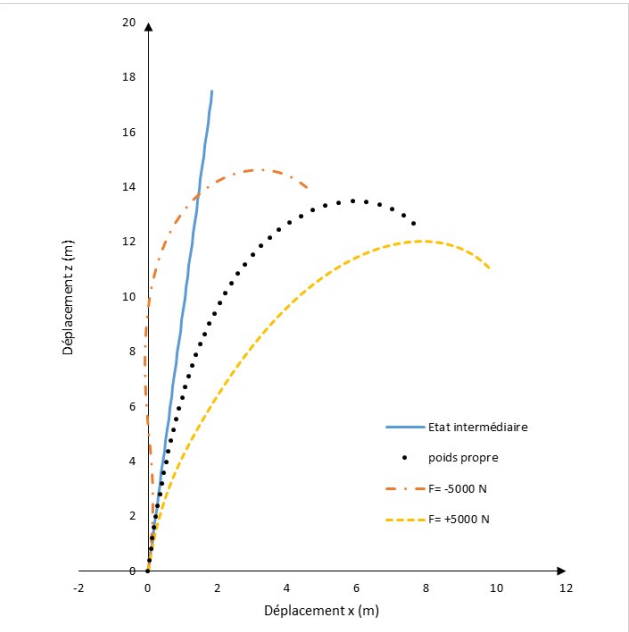


Fig. 3 : Configuration de l'arbre sous l'effet de son propre poids et sous l'effet d'une force appliquée (suivant la courbure et opposée à la courbure de l'arbre). L'arbre considéré ici, a un diamètre à la base de 30 cm pour une hauteur de 20 m, une inclinaison de 6 ° et un module d'Young du bois de 10 GPa. L'effort appliqué à 5 m est de ±5000 N suivant la direction

Les courbes de la Fig. 4 présentent respectivement les déplacements du point d'application de la force (Fig. 4a) et les déformations calculées à 1,30 m environ (Fig. 4b) pour différent valeur

de la force. On observe sur les Fig. 4a et 4b, quelle que soit la direction de chargement, des relations force-déplacement et force-déformation purement linéaires lors du calcul RdM classique. Tandis que le calcul en grand déplacement laisse apparaitre une non-linéarité dans les relations force-déplacement et force-déformation. La différence des rapport force/déplacement et force/déformation entre les deux directions de chargement respectivement de 620 N/m et 0.05 N/µdef peut être due à la contribution inverse de la masse du tronc et du houppier d'une direction à l'autre.

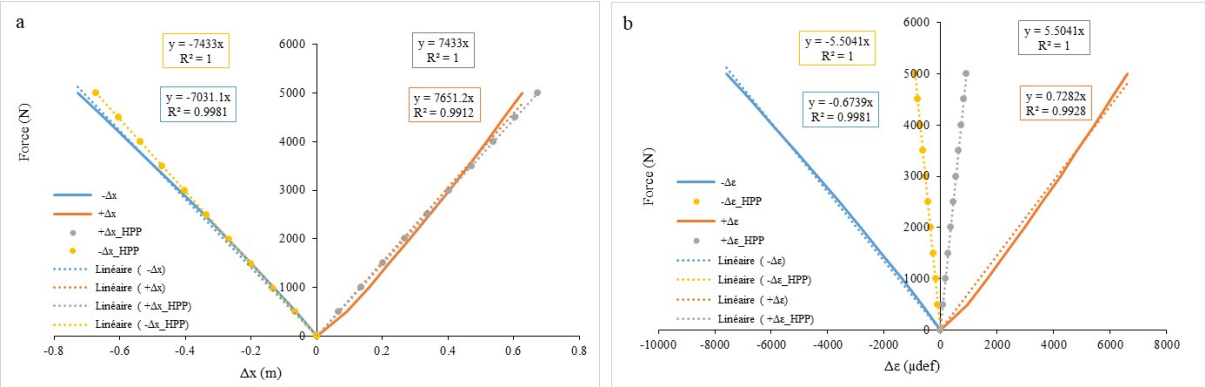


Fig. 4 : Comparaison des courbes force-déplacement et force-déformation issues du calcul en grand déplacement et du calcul RdM classique (HPP). Δx est la variation du déplacement du point d'application de l'effort et Δε est la variation de la déformation à 1.30 m.

Ces résultats montre qu'un calcul en grand déplacement prends assez bien en compte les effets non-linéaire qui peuvent subvenir, du fait de l'élancement important de l'arbre ou du poids propre de la tige et de son houppier.

Remerciement

Les auteurs remercient l'Institut Français du Caoutchouc (IFC) et ces partenaires notamment, la Société des Caoutchoucs de Grand-Béréby (SOGB) et la Société Africaine de Plantations d'Hévéas (SAPH) pour le financement accordé dans le cadre du projet **Vent-Debout Hévéa 1.**

Références

Halford T., Lesnino G., Wessolly L., Gourgue P., Merland J-P. (2008) diagnostic de la tenue mécanique de quatre arbres remarquables à liège (belgique) : Test de traction et tomographie acoustique.

Nicolas D., Hofmann J.P. (1977) Etude de la présence de bois de tension en relation avec le phénomène de casse au vent chez Hevea brasiliensis.

Sterken, P. (2018). Les bases scientifiques des tests de traction, La Forêt 12/18, p 10-13.

Utilisation de la stéréo-corrélation d'images numériques pour identifier le comportement au séchage d'un tube LVL fabriqué à partir de placage vert

PURBA Citra[1], JOFFREY Viguier[1], DENAUD Louis[1], MARCON Bertrand[1]

[1]Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Rue Porte de Paris, 71250 Cluny, France
citra.purba@ensam.eu

Mots clefs : placage ; corrélation d'images; tube ; LVL ; angle du fil ; retrait ; hêtre

Contexte et objectifs

En flexion, les contraintes longitudinales sont nulles à la fibre neutre. Pour cette raison, la fabrication des bois à âme creuse permet d'obtenir des éléments structurels plus légers, et de fabriquer des dimensions qui ne sont pas disponibles actuellement en bois scié. Plusieurs types de bois creux sont disponibles sur le marché, certains sont en bois massif et d'autres en placage. Des études précédentes ont montré que ces bois creux ont la rigidité et la résistance requises pour être utilisés en tant qu'éléments structurels (Hirschmüller et al. 2019, Gilbert et al. 2020). La structure creuse de forme circulaire est l'une des formes les plus étudiées surtout pour son intérêt du point de vue mécanique et son potentiel d''absorption d'énergie (Farley and Jones 1992, Hartig et al. 2018).

La technologie de fabrication additive est en pleine croissance dans tous les secteurs de l'industrie des matériaux y compris l'industrie du bois. La présente étude s'appuie sur un brevet relatif à un procédé de fabrication additive FR1655422 (Pommier et al. 2017), qui consiste à enrouler et à coller des placages verts pour former des tubes cylindriques. Des études récentes montrent que les tubes creux fabriqués à partir de placages peuvent être utilisés pour des éléments structurels tels que les poutres, les poteaux électriques et les systèmes de clouage du renforcement de sol (Gilbert et al. 2020). Le premier objectif de ce projet est de réaliser un prototype du tube fabriqué à partir de placage vert de hêtre. Le deuxième objectif est de comprendre l'influence de la configuration de l'angle du fil sur le comportement au retrait au séchage. Ce dernier a été étudié en utilisant la stéréo-corrélation d'images, qui est de plus en plus utilisée pour l'analyse du retrait du bois (Larsen and Ormarsson 2013, Pang and Jeong 2020)

Matériel et méthode

Dans le cadre de cette étude, trois billons de hêtre ont été utilisés. Avant le déroulage, ces billons ont été immergés dans l'eau à une température de 65 °C pendant 24 heures. Les billons ont ensuite été déroulés en 2 mm d'épaisseur, à 1 m/s avec une barre de pression réglée à 10%. La surface du placage de hêtre fraîchement coupée a d'abord été recouverte de colle polyuréthane (PU) avec un grammage d'environ 300 g/m^2. Les placages verts étaient ensuite roulés sur un cylindre expansible.

Le tube de LVL fabriqué était composé de six plis. Trois feuilles de placage de différentes longueurs ont été arrangées en fonction de la circonférence du cylindre. Chaque feuille de placage a été roulée deux fois autour du cylindre. Afin d'étudier l'influence de l'angle du fil sur le comportement de séchage du tube LVL, trois configurations différentes d'orientation de l'angle du fil par rapport à l'axe du tube ont été utilisées : {0, 0, 0}, {10, 0, 10}, et {-10, 0, 10}. Un film plastique et du ruban adhésif ont ensuite été placés sur toute la surface du tube composé

afin de maintenir l'humidité des placages et de prévenir tout déplacement pendant le pressage de 24 heures.

Après 24 h, le tube encore à l'état vert est disposé sur une balance et laissé à sécher à l'air libre. La mesure de la perte de masse durant le séchage permet de suivre la réduction du taux d'humidité moyen du tube au cours du process. La déformation au séchage du tube due à la perte de l'eau entraînant des retraits dans toutes les directions a été mesurée à l'aide d'un système de stéréo-corrélation d'images (DIC-3D) LaVision StrainMaster composé de 2 caméras CCD 2.3 Mpx et de projecteurs LED synchronisés avec la prise d'images. Pour qu'un point sur la surface de tube soit reconnu par le logiciel de DIC, il faut une texture aléatoire qui permet de reconnaître la zone autour du point d'intérêt. Un mouchetis à l'encre noire a été appliqué sur la surface du tube directement après le pressage. Toutes les heures, le système DIC-3D prend une image du tube et de la balance. Pour chaque tube, la mesure a été effectuée sur une période de 10 jours ou jusqu'à ce que le tube LVL atteigne au moins 15% d'humidité. À la fin de la campagne de mesure, le tube a ensuite été séché au four à 103 ± 2 °C pendant 48 heures pour déterminer sa masse anhydre permettant de calculer les taux d'humidité interne a posteriori.

Résultats et discussion

La Fig. 1 montre l'évolution du retrait tangentiel avec l'humidité interne globale (moyenne) mesurée par la stéréo-corrélation de l'image numérique. Il apparaît que le retrait tangentiel du tube débute alors que le taux d'humidité moyen est encore largement au-dessus du point de saturation de fibre (PSF) théorique du hêtre de 32% (Gérard et al. 2011). Il semble qu'un gradient d'humidité entre la surface extérieure existe, la surface du tube LVL sèche d'abord alors que l'intérieur est toujours humide et se rétracte plus tard. En conséquence, le retrait tangentiel du tube commence avant que la teneur moyenne en humidité de l'ensemble de la pièce ne soit inférieure au PSF. Le retrait du bois, qui commence près du PSF, est généralement mesuré dans de petits morceaux de bois, de sorte que le retrait a tendance à être plus homogène. Quoi qu'il en soit, la valeur présentée ici a été calculée à partir du profil de retrait local. Cette figure montre de plus qu'à un taux d'humidité de 15%, le retrait tangentiel le plus élevé a été constaté dans le tube {0,0,0}. Néanmoins, le retrait tangentiel total réel à 0% d'humidité n'a pas été mesuré dans cette étude. Dans les trois configurations, le tube {10,0,10} présente le retrait tangentiel le plus faible à un taux d'humidité de 15%. Néanmoins, le fait d'enrouler le placage sur le cylindre expansible peut légèrement modifier l'angle du fil réel par rapport à la direction longitudinale du tube malgré les précautions prises lors de la mise en œuvre.

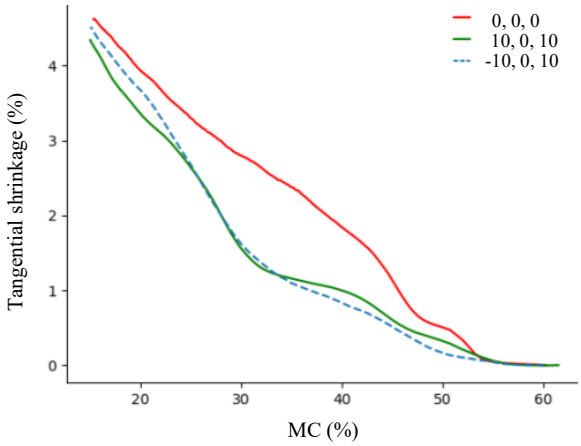
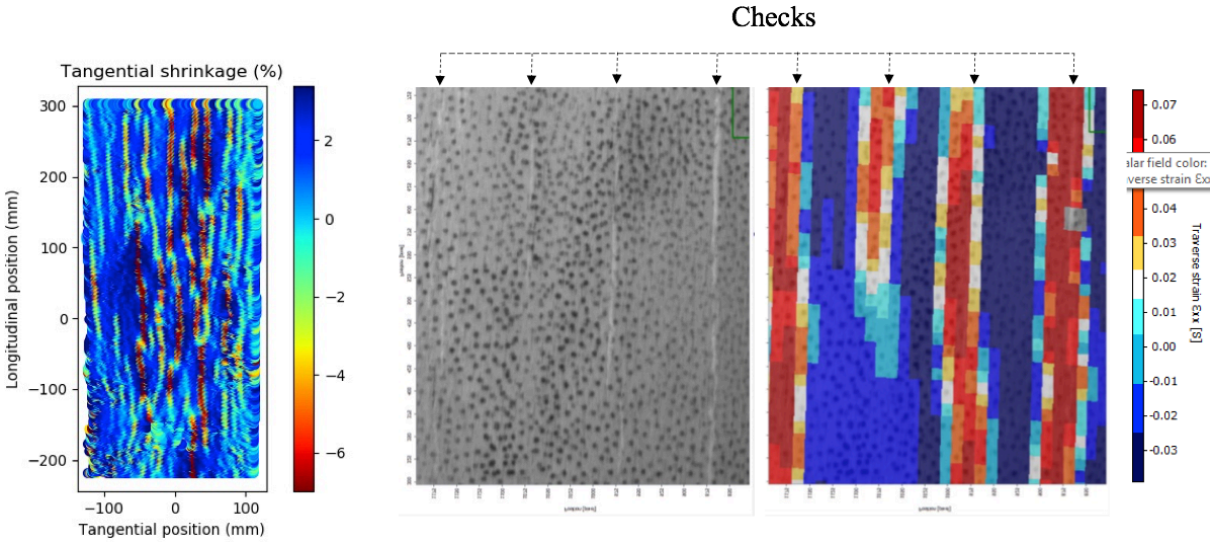


Fig. 1 : Retrait tangentiel mesuré par stéréo-corrélation d'image en fonction de l'humidité interne (MC) globale pour les 3 configurations de tubes

La Fig. 2 montre le champ de retrait tangentiel local à la surface du tube {0,0,0}, mesuré à l'aide de la DIC-3D. La zone colorée de jaune à rouge correspond à la surface où le retrait tangentiel était négatif ou à l'endroit où les fissures sont apparues sur la surface. Cela a été confirmé en superposant l'image de la surface du tube avec les données de déformation. La Fig. 2 représente la présence des retraits négatifs avec les changements d'humidité. Il est à noter que les fissures de surface ont commencé à s'ouvrir après une dizaine d'heures de séchage à l'air ce qui signifie que la surface du tube sèche rapidement.



(a) (b)

Fig. 2 : a) Champ de retrait tangentiel à la surface du tube remis à plat, b) champ de déformations transversales sur la surface du cylindre et sa correspondance avec la localisation des fissures du tube qui sont marquées par des flèches {0,0,0}

La Fig. 3 montre l'évolution de la moyenne de tous les retraits tangentiels négatifs, considérée comme étant l'image de l'ouverture des fissures, avec la réduction de l'humidité globale de tube {0,0,0}. Cette figure montre comment les fissures s'ouvrent quand l'humidité descend vers le PSF puis se referment quand l'humidité devient inférieure au PSF ; ce qui pourrait indiquer un équilibre de l'humidité dans toutes les parties du tube. La même tendance a été remarquée sur les autres tubes mais avec un comportement un peu diffèrent.

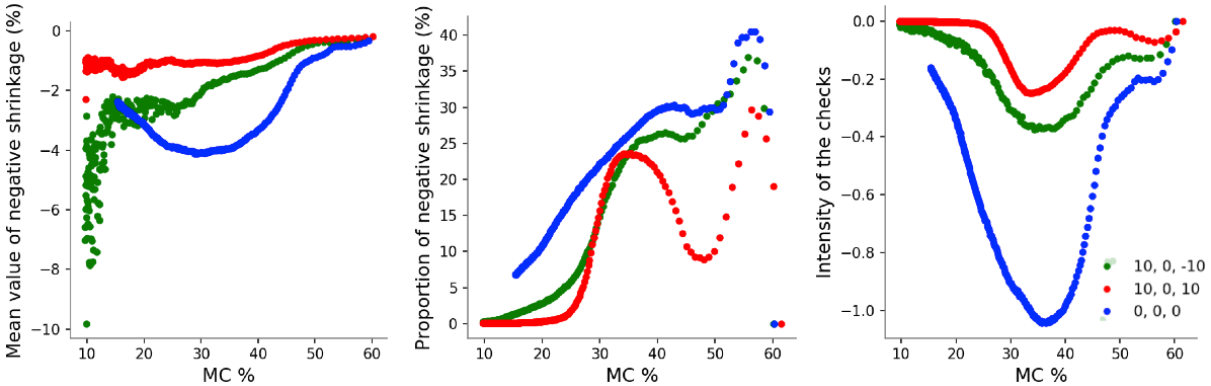


Fig. 3 : Comparaison a) de la valeur moyenne du retrait négatif, b) de la proportion du retrait négatif sur tout la surface observée par DIC-3D, c) de l'intensité des fissures (valeur moyenne / proportion du retrait négatif) des trois configurations de tubes

Sur la Fig. 3 on peut également constater qu'il y a plus de fissures présentes sur le tube {0,0,0} que sur les deux autres et que ces dernières sont également plus écartées avec cette

configuration parallèle aux fibres des placages. Enfin, après le calcul de l'intensité des fissures, il est noté que la présence des fissures atteint un maximum autour du PSF et pour finalement redescendre jusqu'à s'annuler de nouveau lorsque le tube est sec. On constate également que le tube de la configuration {-10,0,10} présente globalement la plus faible intensité de fissuration.

Conclusion et perspectives

La DIC-3D s'avère donc adéquate pour mesurer le retrait tangentiel et étudier l'ouverture et/ou fermeture des fissures sur la surface de tube soumis à des variations d'humidité interne mais également certainement pour constater des déformations dues à des chargements mécaniques. La configuration de la pente du fil lors de l'enroulement du tube influence directement le retrait tangentiel du tube. Dans le cas d'une humidité interne globale atteint 15%, le tube dont les placages sont parallèles à l'axe du tube présente le retrait le plus important, suivi par {-10, 0,10} et {10,0,10}. Le tube de la configuration {-10,0,10} donne la plus faible intensité de fissuration. Néanmoins, les pentes de fil comparées dans cette étude ont été établies lors de la préparation des placages et peuvent être faussées car l'assemblage du tube reste une opération très délicate.

Remerciements

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce au soutien financier de l'Institut Carnot Arts. Les auteurs remercient Regis Pommier de I2M Bordeaux pour la fourniture du cylindre expansible qui nous permet de fabriquer le tube. Les auteurs remercient également la plate-forme technique Xylomat du réseau scientifique Xylomat financée par l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST qui largement été utilisée pour réaliser cette étude.

Références

Farley G.L., Jones R.M. (1992) Crushing characteristics of continuous fiber-reinforced composite tubes. Journal of composite Materials 26:37–50

Gérard J., Guibal D., Paradis et al. (2011) Tropix 7. CIRAD.

Gilbert B.P., Dias-da-Costa D, Lebée A, Foret G (2020) Veneer-based timber circular hollow section beams: Behaviour, modelling and design. Construction and Building Materials 258:120380.

Hartig J.U., Facchini S., Haller P. (2018) Investigations on lateral vehicle impact on moulded wooden tubes made of beech (Fagus sylvatica L.). Construction and Building Materials 174:547–558. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.132

Hirschmüller S., Pravida J., Marte R., Flach M. (2019) Long-term material properties of circular hollow laminated veneer lumber sections under water saturation and cement alkaline attack. Wood Material Science & Engineering 14:142–156.

Larsen F., Ormarsson S. (2013) Numerical and experimental study of moisture-induced stress and strain field developments in timber logs. Wood Science and Technology 47:837–852

Pang S.J., Jeong G.Y. (2020) Swelling and shrinkage behaviors of cross-laminated timber made of different species with various lamina thickness and combinations. Construction and Building Materials 240:117924.

Pommier R., Guillaume G., Matthieu P., Nordine L. (2017) Procédé d'assemblage de bois déroulé en forme de tube et produits issus du sit procédé. Brevet FR3052379.

Une file radiale de référence pour l'analyse de la xylogenèse chez les angiospermes

NOYER Estelle[1], STOJANOVIĆ Marko[1], HORÁČEK Petr[1]

[1]The Czech Academy of Sciences, Global Change Research Institute
noyer.e@czechglobe.cz

Mots clefs : xylogenèse ; file radiale ; vaisseaux ; *Quercus robur* ; *Fraxinus angustifolia* ; *Fagus sylvativa*

Contexte et objectifs

Principalement conduite chez les gymnospermes, l'analyse de la dynamique de la xylogenèse, ou formation du bois, permet de mettre en exergue l'influence du climat sur la séquestration du carbone et contribue à la compréhension des impacts d'épisodes climatiques extrêmes sur les traits anatomiques et fonctionnels du cerne annuel (De Micco et al. 2019).

Pour étudier la formation du cerne, les procédures de routine appliquées actuellement chez les gymnospermes consistent à évaluer le nombre de cellule xylémienne dans chaque phase de développement (élargissement, maturation et cellule mature) en suivant une ou plusieurs files radiales (file de cellule xylémienne produite par une cellule cambiale) durant la saison de croissance. Grâce à une indexation de l'ordre de formation des cellules au sein du cerne annuel final, il est alors possible de dater chaque cellule formée permettant ainsi de reconstituer sa phénologie et sa durée de résidence dans chaque phase de développement (Wodzicki 1971; Rossi et al. 2006; Cuny et al. 2013).

Chez les angiospermes, les études actuelles se focalisent sur le nombre de cellules cambiales, les accroissements radiaux des zones de phase de développement et leur phénologie (Prislan et al. 2013). Seules quelques études ont suivi la formation des premiers vaisseaux formés au cours de l'année (Kudo et al. 2015; Pérez-de-Lis et al. 2016; Kitin and Funada 2016) ou se sont focalisées sur les vaisseaux d'une seule partie du cerne (Giagli et al. 2016). En effet, l'instar des gymnospermes, le xylème des angiospermes présente différents types d'éléments cellulaires agencés non uniformément. De plus, la formation d'un vaisseau amorce un décalage spatial des autres cellules environnantes formées en même temps (Fig. 1). C'est notamment ce décalage spatial structurel qui limite l'identification des files radiales et l'automatisation des algorithmes d'analyse d'images.

Le travail présenté ici vise donc à proposer une première procédure d'analyse d'image de coupes anatomiques de bois d'angiospermes dans le but d'obtenir les dates de formation et de changement de phase de développement de chaque cellule xylémienne. L'un des critères prépondérants est l'utilisation d'une même méthode chez les espèces à pores diffus et à zone poreuse. Les résultats exposés se focalisent sur les vaisseaux, les plus grandes cellules xylémiennes formées dont leur taille et distribution spatiale fluctuent entre les espèces mais aussi au cours de l'année.

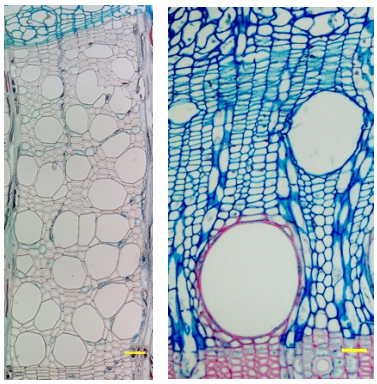


Fig. 1 : Coupes anatomiques de *Fagus sylvatica* L. (cellules matures, gauche) et de *Fraxinus angustifolia* (cellules en phase d'élargissement et cours de lignification, droite). barre jaune : 50 µm.

Matériel et méthode

Jeu de données

Trois essences d'angiospermes (*Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* et *Fagus sylvativa* L.) présentant différentes structures microscopiques (zone poreuse vs. pores diffus) ont été sélectionné. La formation du bois a été suivi sur des coupes anatomiques provenant de microcarottes prélevées hebdomadairement sur 6 arbres par espèce durant l'année 2018.

Pour chaque coupe, une zone de mesure comprenant au minimum 3 files radiales est délimitée. Le nombre de files radiales, puis de fibres, parenchymes axiaux et vaisseaux dans chaque phase de développement sont comptés par pointage manuel permettant d'accéder aux coordonnées X et Y de chaque cellule. Les fibres et parenchymes axiaux forment le groupe « APF » jusqu'au stade de cellule mature.

Analyse d'image

Le but de la procédure d'analyse d'image est d'acquérir deux données essentielles pour la réalisation des modèles : *(i)* le nombre de cellule produite par la file radiale et *(ii)* l'indexation du vaisseau au sein de la file radiale.

Pour cela, la méthode développée reconstitue une file radiale qui sert de référence à l'image traitée en terme de nombre de cellule et d'index. Cette file radiale de référence (FRR) est exclusivement définie à partir des fibres et parenchymes axiaux comptés et localisés sur l'image. Un nombre moyen de cellule APF produite par file radiale (axe x) et par couche temporelle (axe y) est estimé grâce à une sectorisation de l'image puis à une labellisation de chaque secteur. Une moyenne pondérée est ensuite calculée par couche temporelle en fonction du type de cellule présent par secteur. L'ajustement d'un modèle additif généralisé (GAM) sur la tendance intra-annuelle permet l'estimation la date de production pour chaque cellule de la FRR. Enfin, après l'identification des secteurs appartenant à chaque vaisseau de la zone étudiée, l'index d'un vaisseau est déterminé en regard du nombre d'APF de la FRR.

Résultats

Les premiers résultats montrent que le nombre de cellule estimé de la FRR peut varier en fonction de la taille de la zone sélectionnée : plus la zone est grande, plus le nombre de cellule de référence sera représentatif d'une file radiale sans vaisseaux. L'indexation des vaisseaux, quant à elle, est cohérente avec une indexation manuelle. Néanmoins pour que cette méthode soit applicable, une lignée de cellule APF adjacente (et donc toute la file radiale correspondante) à chaque vaisseau compté doit être incluse dans la zone de mesure.

Enfin, deux améliorations sont à prévoir : *(i)* l'implémentation de la phase de développement des cellules APF de la FRR et *(ii)* l'obtention de la date de production des plus petites cellules du xylème (fibres et parenchymes axiaux).

Remerciements

This work was supported by Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences.

Références

Cuny H.E., Rathgeber C.B.K., Kiessé T.S., et al (2013) Generalized additive models reveal the intrinsic complexity of wood formation dynamics. J Exp Bot 64:1983–1994.

De Micco V., Carrer M., Rathgeber C.B.K., et al (2019) From xylogenesis to tree rings: Wood traits to investigate tree response to environmental changes. IAWA J 40:155–182.

Giagli K., Gričar J., Vavrčík H., et al (2016) The effects of drought on wood formation in Fagus sylvatica during two constrating years. IAWA J 37:332–348.

Kitin P., Funada R. (2016) Earlywood vessels in ring-porous trees become functional for water transport after bud burst and before the maturation of the current-year leaves. IAWA J 37:315–331.

Kudo K., Yasue K., Hosoo Y., Funada R. (2015) Relationship between formation of earlywood vessels and leaf phenology in two ring-porous hardwoods, Quercus serrata and Robinia pseudoacacia, in early spring. J Wood Sci 61:455–464.

Pérez-de-Lis G., Rossi S., Vázquez-Ruiz R.A., et al (2016) Do changes in spring phenology affect earlywood vessels? Perspective from the xylogenesis monitoring of two sympatric ring-porous oaks. New Phytol 209:521–530.

Prislan P., Gričar J., de Luis M., et al (2013) Phenological variation in xylem and phloem formation in Fagus sylvatica from two contrasting sites. Agric For Meteorol 180:142–151.

Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T. (2006) Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: an example at the Alpine timberline. IAWA J., 27:383–394

Wodzicki T.J. (1971) Mechanism of xylem differentiation in Pinus silvestris L. J Exp Bot 22:670–687.

Modèles biomimétiques de la paroi cellulaire végétale et modifications enzymatiques

TOUZARD Maeva[1], HEUX Laurent[1]

[1]Cermav-CNRS, Grenoble, France
maeva.touzard@cermav.cnrs.fr

Mots clefs : biomimétisme ; paroi ; cellule végétale ; matériau ; PME

Contexte et objectifs

La paroi primaire de la cellule végétale est un matériau composite principalement constitué de microfibrilles de cellulose, d'hémicelluloses, de pectines et de protéines, et hydraté à 80% (Fig. 1). Bien qu'elle ait été étudiée depuis de nombreuses années, les interactions entre ses constituants et leurs rôles, ses propriétés mécaniques et surtout son développement et sa croissance sont des thématiques de recherches encore d'actualité. La reconstitution de parois modèles à partir des constituants majeurs de la paroi végétale primaire pourrait permettre de compléter la compréhension des phénomènes observés *in-vivo*. Par exemple, comprendre le remodelage de la paroi lors de sa croissance et interpréter l'impact d'enzymes sur ce remodelage est rendu compliqué par la capacité d'adaptation des matériaux vivants étudiés. Une paroi cellulaire artificielle biomimétique serait un support contrôlable dans un environnement également contrôlable. La composition de la paroi, et la concentration en ions ou le pH du milieu hydratant sont des exemples de paramètres dont l'impact sur les réactions enzymatiques pourrait être plus facilement évalué avec ces modèles.

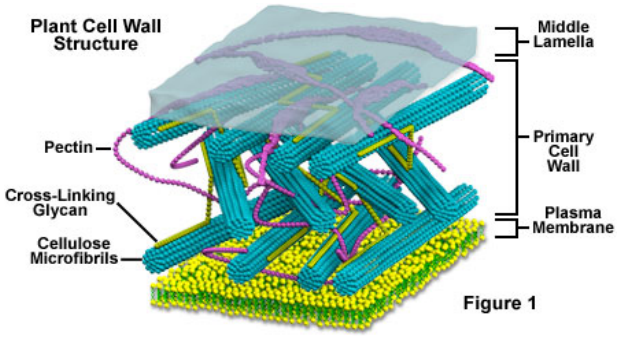


Fig. 1 : représentation schématique d'une paroi primaire de cellule végétale (Davidson 2015)

Le premier enjeu est donc de pouvoir recréer à partir de trois constituants majeurs de la paroi (la cellulose, les hémicelluloses et les pectines) les interactions nécessaires à l'obtention d'un matériau reproduisant le comportement mécanique d'une paroi hydratée. Ces trois composants étant des polysaccharides, leur affinité avec l'eau rend difficile leur cohésion dans ce milieu. Au Cermav, l'étude des interactions entre la cellulose et les hémicelluloses a déjà permis de développer des premiers modèles biomimétiques (Radavidson 2016). Cependant, l'un des principaux constituants, les pectines, reste à intégrer à ces modèles. Or les pectines semblent être un élément au rôle majeur dans la morphogenèse de la cellule végétale (Höfte 2012). Le premier objectif de cette thèse est donc de poursuivre le développement de ces modèles en incorporant les pectines. L'impact d'enzymes identifiées comme actrices du remodelage - les méthylesterases de pectines (PME), les polygalacturonases (PG) et les lyases de pectines (PL) - sur les propriétés mécaniques et la morphologie des modèles sera étudié. Les réactions

enzymatiques ayant lieues en milieu aqueux, il est donc essentiel de développer un matériau ayant une tenue mécanique dans cet environnement.

De plus, ces parois modèles dont les propriétés peuvent être modifiées grâce à des enzymes sont également des matériaux innovants. Tous les constituants sont biocompatibles et dégradables ce qui en fait un matériau intéressant concernant les enjeux environnementaux et de santé actuels. La modification des propriétés mécaniques par voie enzymatique pourrait permettre la création de matériaux aux formes contrôlées ou de développer des stratégies d'encapsulation.

Matériel et méthodes

Préparation des matériaux

Les matériaux sont préparés sous forme de films par casting. Une suspension de microfibrilles de cellulose (MFC), issue d'une extraction par procédé kraft, est mélangée à des pectines lyophilisées. La concentration finale en polysaccharides est de 2,5% (m/m). La solution de dispersion contient du calcium à une concentration de 2,6 mM à 6,25 mM selon le degré de méthylation (DM) des pectines. La solution est séchée à 40°C pendant 48h.

Caractérisations chimiques

Les réactions enzymatiques sur les films biomimétiques sont réalisées dans un milieu tampon MOPS (acide 4-morpholinopropanesulphonique) à pH 6. Du chlorure de calcium $CaCl_2$ est ajouté au milieu, sa concentration finale variant de 0,01 à 0,1 mol/L selon les réactions. Un ratio stœchiométrique est défini par $R = 2\ \frac{[Ca^{2+}]}{[COO^-]}$ (Fraeye 2010). Des bandes de films de dimensions 50x5 mm sont trempées dans 15 mL de ce milieu pendant 30 min avant d'ajouter 0,5 à 10 µL/mL de PME (issue d'Aspergillus aculeatus). La réaction est réalisée à 24°C.

Le dosage du méthanol est utilisé pour quantifier l'activité enzymatique de la PME et permet de suivre l'évolution du DM des pectines au cours de la réaction. Le dosage est adapté de celui de Anthon (2004) qui consiste à oxyder le méthanol par l'alcool oxydase (AO) en présence de 3-methyl-2-benzothiazolinone hydrazone (MBTH). Le produit de cette réaction forme un complexe bleu (bleu formazan) en milieu acide et en présence de fer (III), détectable par absorbance UV à 620 nm.

Les matériaux sont également analysés par RMN du carbone avec un spectromètre Bruker de 400 MHz en utilisant la méthode CP-MAS (cross-polarization and magical angle spinning). La vitesse de rotation de l'échantillon est de 12000 Hz et une accumulation d'au moins 3000 scans est réalisée.

Caractérisations mécaniques

Les essais de traction sont réalisés sur machine Shimadzu AGS-X avec une cellule de force de 20 N. Les bandes de films de dimension 50x5 mm sont testées après trempage ou réaction enzymatique. La durée d'immersion varie de 30 min à 24h. L'excès d'eau à la surface du film est éliminé à l'aide de papier absorbant avant de placer le film entre des mors de traction plat en caoutchouc. La longueur utile de l'échantillon est 20 mm et la vitesse de traction est de 0.1 mm/s. Les dimensions du film humide sont mesurées après l'essai et les valeurs de contraintes à la rupture et de modules d'élasticités en sont déduites.

Résultats et discussion

Les enzymes sur lesquelles l'étude se concentre agissent sur les pectines. Un premier modèle simplifié constitué seulement de cellulose et pectines est donc réalisé.

Propriétés mécaniques des films biomimétiques

Les films MFC/pectines trempés dans un milieu calcium ont un comportement plutôt élastique (Fig. 2) quel que soit le DM des pectines (P35 : DM = 35%, P52 : DM = 52%). Ce dernier influence fortement la rigidité et la résistance des films. Plus le DM est faible, plus il y a des sites d'interactions du calcium avec les pectines et plus le réseau sera dense. Une force plus importante est alors nécessaire pour déformer et pour rompre ce réseau, comme le montre la comparaison entre des films MFC/P52 et des films MFC/P35 (Fig. 3). A un DM supérieur à 52%, la résistance des films devient très faible et aléatoire et donc difficilement mesurable.

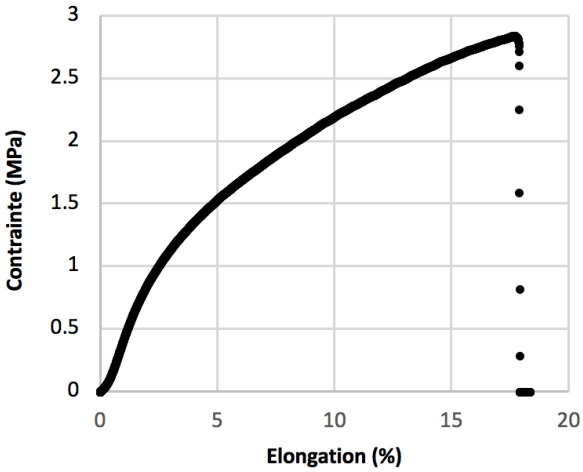


Fig. 2 : exemple d'une courbe de traction (film MFC/P35)

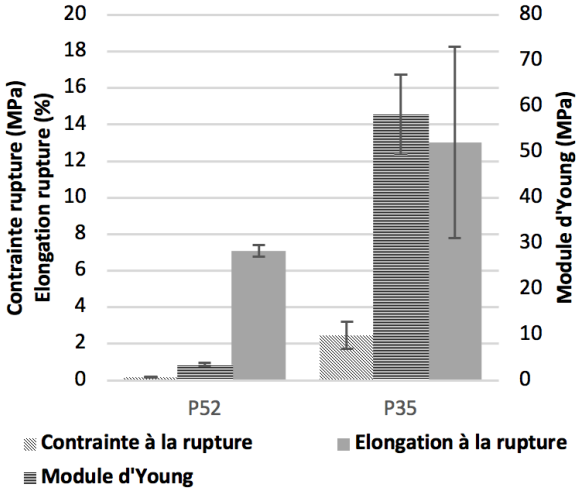


Fig. 3 : comparaison des propriétés mécaniques de films MFC/pectines trempés 1h dans une solution à 0.1 M en Ca2+

Impact de la déméthylation enzymatique sur les propriétés mécaniques des films biomimétiques

Un suivi des propriétés mécaniques est réalisé pour différentes durées de réaction, en partant d'un film MFC/P61 en présence de calcium à 0,1 mol/L (Fig. 4). Le film de référence est trempé 1h dans le milieu tampon sans enzyme. Après 1h de réaction avec la PME à 5 µL/mL, un DM = 57% est obtenu, après 3h DM = 48% et après 24h avec la PME à 10 µL/mL DM = 21%. Le DM diminue faiblement entre 0 et 1h de réaction et diminue plus rapidement entre 1h et 3h de réaction. Cela peut s'expliquer par la diffusion de l'enzyme dans le film. Le DM diminue considérablement entre 3h et 24h de réaction mais les pectines de moins en moins méthylées deviennent des substrats de moins en moins favorables pour la PME ce qui ne permet pas d'atteindre des DM plus faibles. Le DM à partir duquel la vitesse de réaction diminue reste encore à déterminer selon les conditions de réaction. Jusqu'à 3h de réaction, on observe une rigidification et une augmentation de la résistance du film avec la diminution du DM, liée à la formation des interactions avec le calcium (Fig. 5). L'allongement à la rupture augmente entre 0 et 1h de réaction mais semble se stabiliser ensuite. Pour une réaction de 24h la résistance et la rigidité diminuent malgré une diminution du DM. La perte de pectines par solubilisation en est la raison principale.

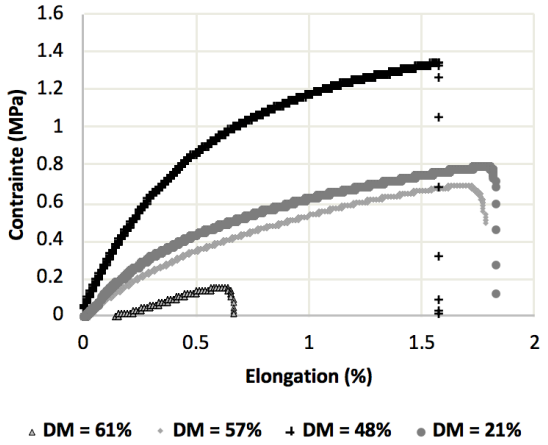


Fig. 4 : exemple de courbes de traction montrant l'évolution des propriétés mécaniques avec la réduction du DM par voie enzymatique

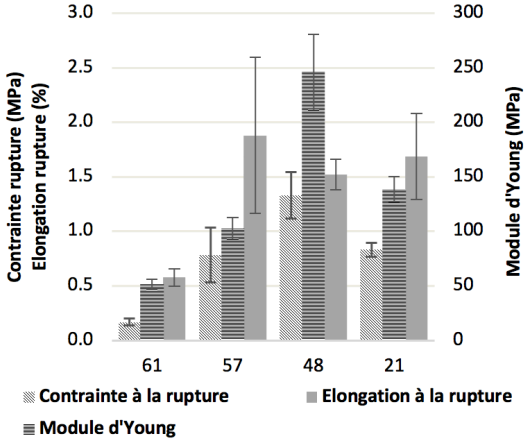


Fig. 5 : évolution des propriétés mécaniques avec la réduction du DM par voie enzymatique

Conclusion et perspective

Un nouveau matériau biomimétique de la paroi cellulaire végétale a été développé à partir de ses constituants principaux : la cellulose, les hémicelluloses et les pectines. Les caractérisations du matériau peuvent être réalisées par RMN du solide et tests de traction. Les films MFC/pectines, notamment ceux avec des pectines faiblement estérifiées, sont des matériaux ayant une résistance à l'état hydraté contrairement à des films MFC simples. De plus, l'activité des PME sur ce milieu hétérogène est observable et quantifiable et les interactions des sites déméthylés par la PME avec le calcium sont également montrées.

L'objectif final est de pouvoir lier ces modifications structurales à des modèles de morphogenèse de la paroi.

Références

Anthon G.E., Barrett D.M. (2004) Comparison of Three Colorimetric Reagents in the Determination of Methanol with Alcohol Oxidase. Application to the Assay of Pectin Methylesterase, J. Agric. Food Chem, 52 (12), 3749–3753.

Davidson M.W. (2015) Molecular Expressions Cell Biology: Plant Cell Structure - Cell Wall https://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html (accessed Feb 10, 2020).

Höfte H., Peaucelle A., Braybrook S. (2012) Cell Wall Mechanics and Growth Control in Plants: The Role of Pectins Revisited, Front. Plant Sci., 3.

Fraeye I., Duvetter T., Doungla E., Van Loey A., Hendrickx M. (2010) Fine-Tuning the Properties of Pectin–Calcium Gels by Control of Pectin Fine Structure, Gel Composition and Environmental Conditions, Trends in Food Science & Technology, 21 (5), 219–228.

Radavidson H. (2016) Vésicules Lipidiques Biomimétiques Décorées Par Un Assemblage Multicouche Nanocristaux de Cellulose/Xyloglucane : Élaboration et Caractérisation Mécanique, thesis, Université Grenoble Alpes.

Investigation sur les espèces de bois les plus utilisées à Madagascar

RABEVAZAHA Felanirina[1], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1], RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], EYMA Florent[2]

[1]Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Foresterie et Environnement, Antananarivo, Madagascar
[2] Université Paul Sabatier, Institut Universitaire de Technologie, Département GMP, Laboratoire Institut Clément Ader, Tarbes, France
felanaralay@gmail.com, ramananantoandro@gmail.com, andriambelo.radonirina@gmail.com, florent.eyma@iut-tarbes.fr

Mots clefs : nouvelles essences ; classification ; reboisement ; Madagascar.

Contexte

Etant signataire de la Convention sur le commerce International des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES), Madagascar est soumis à certaines recommandations vis-à-vis de la gestion de ses ressources forestières. Une de ces recommandations est la ratification de l'Accord Internationale de 2006 sur les Bois Tropicaux (AIBT de 2006). Ainsi, Madagascar a ratifié l'AIBT en octobre 2016 et fait désormais partie des membres de l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT). Pour cela, certaines dispositions devraient être prises pour que le pays puisse bénéficier des multiples avantages offerts par l'AIBT, dont l'ouverture des marchés des pays consommateurs membres de l'OIBT aux bois de Madagascar en tant que pays producteur. La mise à jour de la classification des essences forestières est l'une des dispositions urgentes à prendre. La classification est un outil permettant de catégoriser les espèces forestières basée, pour Madagascar, sur l'utilisation et la valeur des espèces. Etant donné que chaque classification est élaborée selon un objectif bien défini, la classification des essences forestières malgache sert de référence pour savoir quelles espèces utiliser pour tel ou tel besoin. La dernière révision de la classification des essences malgaches date de 1943. Elle n'est donc plus appropriée au contexte actuel pour deux raisons : (i) de nombreuses essences rencontrées au niveau des marchés locaux n'y sont pas mentionnées étant donné que la majorité des essences qui y sont citées ont presque disparu du marché, (ii) d'autres essences pouvant être valorisées en substitution de celles dont le stock est menacé n'y figurent pas encore.

De ce fait, élaborer une nouvelle classification est impératif, et servira d'outil de travail permettant une meilleure valorisation des bois malgaches, mais aussi afin d'offrir une large gamme de produits pour les consommateurs locaux ou internationaux sans pour autant porter atteinte à la durabilité des essences commercialisées. Pour cela, la proposition de nouvelles essences de remplacement est plus qu'urgente pour assurer une régénération des essences de bois nobles et plus globalement pour sauver la forêt malgache.

Objectif

L'objectif général de cette étude est de contribuer à la révision de l'actuelle classification des bois Malagasy. Plus spécifiquement, il s'agit d'identifier les essences de bois les plus utilisées et les plus appréciées à Madagascar, qui pourront figurer ultérieurement dans la nouvelle classification des bois malgaches.

Matériels et méthode

La méthodologie générale qui a été adoptée pour atteindre l'objectif de la présente étude est la suivante :

- Faire des investigations bibliographiques, pour avoir des informations de base sur la classification actuelle et sur l'état des lieux des essences forestières en forêt ou sur le marché. L'idée est d'identifier les critères de classification des essences forestières et d'établir des listes sommaires d'essences à intégrer dans la nouvelle classification.
- Mener des travaux d'enquêtes au niveau des différentes parties prenantes : administration forestière, professionnels du métier de bois, consommateurs pour déterminer les contraintes, les attentes et les préférences des consommateurs afin d'identifier leur attente et les critères à prendre en compte dans la mise en place de la nouvelle classification des bois.

Résultats

Le principal résultat est une liste des espèces les plus rencontrées sur le marché local, les plus utilisées dans les reboisements, les enrichissements et les restaurations forestières, celles utilisées pour la sylviculture à Madagascar, ainsi que celles préférées des consommateurs.

Les espèces les plus rencontrées sur le marché local

Plusieurs études antérieures sur les espèces les plus rencontrées au niveau des marchés ont été déjà effectuées. Il s'agit des études effectuées par Ramanakoto (2012), Rajemison (2013), Rajonshon (2014), Ramananantoandro (2013).

En tout, 59 essences sont les plus rencontrées sur le marché local, appartenant à 27 Familles.

Les espèces les plus utilisées dans les reboisements, les enrichissements et les restaurations forestières

D'après les études de Gabathuler et al. (2014) sur les reboisements paysans dans les Hautes Terres centrales de Madagascar en 25 ans, et WWF (2011), les espèces les plus utilisées en reboisement sont surtout celles appartenant aux Genres : *Pinus sp, Eucalyptus sp, Acacia sp*. du fait que celles-ci sont rustiques et adaptées aux qualités du sol souvent médiocres sur les terrains défrichés.

Il y a aussi d'autres espèces, rustiques et s'adaptant aux qualités du sol, très utilisées comme *Grevillea sp., Callitris sp., Cupressus sp., Casuarina sp.* et le Neem. En plus petite quantité, il y a *Colvillea racemosa, Collubrina decipiens, Stereospermum sp., Cassia siamea*.

Une liste des essences forestières pouvant être utilisées pour la restauration des paysages forestiers a été récemment élaborée par le MEDD en 2019, dont celles présentant des intérêts pour l'utilisation du bois sont regroupées dans 182 espèces appartenant à 62 familles

Les espèces les plus utilisées pour la sylviculture à Madagascar

L'ESSA-forêts (1993) a aussi présenté une liste des essences utilisées pour la sylviculture à Madagascar. Ces essences ont été choisies car celles-ci présentent des intérêts économiques, constituent des essences de remplacement de celles qui sont devenues rares, et enfin n'ont pas encore fait l'objet de recherches sylvicoles et technologiques. Cette liste comporte 80 essences regroupées dans 29 Familles.

Les espèces les plus utilisées, les plus commercialisées et les préférées des consommateurs

Les travaux d'enquêtes ont été effectués au niveau de l'administration forestière, les exploitants forestiers, les commerçants de bois et consommateurs au niveau de différentes régions de Madagascar le long de l'axe Est : Analamanga, Alaotra Mangoro, Atsinanana, Analanjirofo et de l'axe Nord : Sofia, Diana, Boeny et Betsiboka.

Les critères de choix des bois par les consommateurs sont surtout la densité, la couleur, et selon les possibilités d'utilisation.

Les espèces les plus utilisées par les consommateurs et/ou les plus abondantes sur le marché sont subdivisées en plusieurs groupes par ordre d'importance :

- les espèces les plus utilisées en ébénisterie, composées d'espèces appartenant à la catégorie 2 de l'actuelle classification, ou la catégorie des bois d'ébénisterie et de menuiserie fine ou de grande valeur,
- les espèces appartenant à la catégorie 1, ou la catégorie des bois spéciaux,
- quelques espèces appartenant à la catégorie 3, ou catégorie des bois de charpente, d'embarcations, de menuiserie, de charronnage et à traverses,
- quelques espèces appartenant à la catégorie 4, ou catégorie des bois de caisserie et de menus usages ou de valeur moyenne,
- quelques espèces appartenant à la catégorie 5, ou catégorie des bois de chauffage et à charbon,
- quelques espèces à bois tendre.

Par ailleurs, Cailliez et Gueneau (1972) ont aussi proposé des espèces ayant déjà fait objet d'études et aptes à des utilisations précises. Trois types d'emplois ont été proposés : le plaçage déroulé, les parquets et la charpente regroupant 20, 6 et 35 espèces, respectivement.

Les attentes des différentes parties prenantes

Celles-ci se résument comme suit : aucune espèce répertoriée dans la classification ne devrait être interdite d'exploitation ; la révision de la catégorisation des espèces dans la classification devrait prendre en compte les propriétés technologiques et sylvicoles ainsi que les préférences des consommateurs pour une meilleure valorisation de chaque espèce. Les parties prenantes ont aussi identifié des contraintes qu'il faudra considérer dans le choix des essences à intégrer dans la nouvelle classification des bois malgaches :

- Des espèces à proposer dans la nouvelle classification ne sont pas encore associées à un nom scientifique et nécessitent encore une identification
- L'existence et l'utilité de l'actuelle classification ne sont connues que par peu d'acteurs de la filière bois. Ainsi, espérer atteindre les objectifs assignés pour la mise en place d'une nouvelle classification implique obligatoirement la communication et la vulgarisation de celle-ci aux différentes parties prenantes
- La grande diversité floristique de Madagascar (plus de 4000 espèces) fait que de nombreuses espèces de bois, peuvent ne pas être répertoriées dans la classification. De ce fait, la gestion de celles-ci ne sera toujours assurée qu'en partie, sauf si une mise à jour périodique est proposée pour la classification.

Conclusion et perspectives

La principale perspective de l'établissement d'une liste de nouvelles essences à inclure dans une nouvelle classification de bois est de faire connaitre l'existence et l'importance des essences peu connues du marché, encore en abondance, afin de : déconcentrer l'exploitation des espèces traditionnelles habituelles et de diversifier les produits rencontrés sur le marché.

Mettre à jour la classification des bois à Madagascar revient à prendre en compte les besoins des différentes parties prenantes concernées par la filière bois à Madagascar: les consommateurs, les commerçants, les transformateurs, les exploitants, et l'Etat. Pour cela, différentes étapes sont à franchir dont l'identification des espèces potentielles à inclure dans cette classification. Par ailleurs, cette proposition de liste a été établie à partir uniquement de la littérature existante et des enquêtes auprès des acteurs de la filière bois. Ainsi, la prochaine étape sera de confronter ces résultats avec la disponibilité des essences en forêt. Ceci nécessitera l'analyse des données d'inventaires nationales.

Références

Cailliez F., Gueneau P. (1972) Analyse en composantes principales des propriétés technologiques des bois Malgaches, Annales des sciences forestières, INFRA/EDP Sciences, 215-265 p.

ESSA (1993) Choix des essences pour la sylviculture à Madagascar, Akon'ny ala, Numero spécial

Gabathuler E., Rabevohitra M.V.R., Rakotondranaly N., Bachmann F. (2014) Reboisements paysans sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, Capitalisation de projet de reboisement paysan et de ses impacts après 25 ans, MINENVEF, SAVAIVO, Université de Berne

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2019), Guide des essences pour la Restauration des Paysages Forestiers à Madagascar, PAGE/GIZ, 484p.

Minten B., Moser C. (2003) Forêts : usages et menaces sur une ressource. Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar, USAID, Cornell University, INSTAT, FOFIFA, 86-89 p.

Rajemison A.H. (2013) Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois : Cas du Palissandre de Madagascar, Application en ameublement, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) Cotutelle internationale avec ESSA Forêt Université d'Antananarivo, Madagascar.

Rajohnson H. (2014) Meilleure connaissance des propriétés des bois utilisés à Antananarivo, pour une valorisation durable des essences autochtones, Mémoire de DEA en Foresterie-Environnement-Développement, Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

Rakotovao G., Rabevohitra R., Collas de Chatelperron P., Guibal D., Gerard J. (2012) Atlas des bois de Madagascar, Quae, Versailles.

Ramanakoto M.F. (2012) Etude des préférences des consommateurs tananariviens en bois d'ameublement, Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.

Ramananantoandro, T. (2013) Résultats d'enquêtes sur les essences les plus utilisées dans quarante industries de transformation du bois à Antananarivo, Rapport UFR Sciences du Bois, Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, 2 pages.

World Resources Institute (2016), Le bois précieux de Madagascar, Evaluation scientifique et technique en vue de la réalisation des objectifs CITES, World Bank Group, PROFOR.

WWF (2011) Reboisement bois energie dans le Sud-Ouest de Madagascar le bilan de trois campagnes, Synergie Energie Environnement dans le Sud-Ouest (SEESO).

Spectroscopie proche infrarouge « low-cost » et analyses de données multivariées pour prédire le taux de rétention des produits de préservation du bois

RUBINI Morandise[1], DULUCQ Pauline[1], CHARRIER Bertrand[1]

[1] CNRS / Université de Pau & des Pays de l'Adour, Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux - Xylomat, UMR5254, 40004, Mont de Marsan, France
morandise.rubini@univ-pau.fr

Mots clefs : taux de rétention ; préservation du bois ; pin maritime ; proche infrarouge ; chimiométrie

Contexte et objectifs

La caractérisation rapide des produits de préservation du bois est un enjeu industriel important. La spectroscopie proche infrarouge pourrait être un outil de mesure performant permettant d'identifier les produits biocides dans le bois. Le but de ce travail est de démontrer qu'un spectromètre proche infrarouge « low-cost » (*SCiO*, Consumer Physics), couplé avec de l'analyse de données multivariées, peut être utilisé pour quantifier le taux de rétention des produits de préservation dans le bois. Ce spectromètre présente l'avantage d'être portable, facile à utiliser, et de faire des mesures de manière rapide et non destructive. Cinq produits de préservation du bois ont été étudiés. Différents modèles d'étalonnage ont été créés en utilisant la régression des moindres carrés partiels (PLS). On montre que ces modèles peuvent être utilisés pour quantifier les taux de rétention des produits de préservation du bois.

Matériels et méthodes

Imprégnation du bois

Les imprégnations sont réalisées avec 5 produits de préservation différents (Tab. 1) à 5 concentrations différentes (10, 30, 50, 70, 100 %). Au final, 26 plaquettes de bois sont utilisées pour chaque concentration, ce qui fait un total de 130 plaquettes par produits de préservation.

Tab. 1 : Caractéristiques des produits de préservation du bois utilisées.

Produits de préservation	Nom dans ce résumé	Molécules actives dans le produit de préservation
Produits commerciaux « professionnels »	GRI	3,38 % de propiconazole, et 1,25 % de perméthrine
	MAR	16,3 % de carbonate de cuivre, 3,5 % de bis-(N-Cyclohexyldiazeniumdioxy)-cuivre, et 5,0 % d'acide borique
	VER	
Produits commerciaux « grand public »	3V3	0,645 % perméthrine
	XYL	0,1 % cyperméthrine, 0,15 % propiconazole, 0,05 % tébuconazole, et 0,05 % IPBC

Des planches de bois de pin maritime (Pinus Pinaster) non traitées, et principalement constituées d'aubier ont été gracieusement fournis par la Scierie Labadie (Roquefort, France). Les planches de bois ont été découpées, à l'aide d'une scie circulaire, en plaquettes de dimensions ~ 50 mm x ~ 25 mm x ~ 8 mm (L x l x h).

Les imprégnations sont réalisées selon la norme NF EN 350 (2016) avec quelques modifications pour faciliter la mise en œuvre des expériences en laboratoire.

Spectroscopie proche infrarouge et analyse de données spectrales

Toutes les plaquettes de bois ont été scannées en utilisant un spectromètre portable (SCiO, Consumer Physics). La gamme spectrale d'acquisition est comprise entre 740 et 1070 nm. Les spectres sont acquis en réflexion diffuse. Pour chaque échantillon, six spectres sont acquis sur chacune des deux faces radiales, puis, une médiane est calculée sur ces douze spectres pour avoir un spectre représentatif de l'échantillon.

Les données spectrales sont prétraitées pour mettre en évidence des informations « cachées » et corriger les effets de la diffusion de la lumière. Différents algorithmes de prétraitement (*Preprocessing*) ont été utilisés. Les prétraitements sont retenus sur la base des performances pour l'étalonnage du modèle.

Une autre étape importante dans la création d'un modèle est le partitionnement du jeu de données initial. L'objectif de cette étape est d'obtenir deux jeux de données indépendants : un premier sous-jeux de données qui va permettre d'étalonner le modèle (calibration), puis, un second sous-jeux de données qui va permettre de valider les performances du modèle sur des données non-connues par le modèle (validation). Pour ce faire, l'algorithme Duplex est utilisé : 70 % des données sont placées dans le sous-jeu de calibration ; 30 % des données sont placées dans le sous-jeu de validation.

Une régression des moindres carrés partiels (PLS) a par la suite été appliquée sur les spectres prétraités du sous-jeux de calibration. La validation croisée (15 blocs) du modèle a permis de sélectionner un nombre optimal de variables latentes (LVs) en se basant sur l'erreur quadratique moyenne la plus faible ($RMSECV$). Une fois le modèle développé, les valeurs des taux de rétention sont régressées contre les valeurs prédites par le modèle, les coefficients de détermination (R^2_{Cal}) et les erreurs quadratiques moyennes ($RMSEC$) ont été calculées pour évaluer les performances du modèle sur le sous-jeux de calibration. De même pour le sous-jeux de validation, les valeurs des taux de rétention sont régressées contre les valeurs prédites par le modèle, les coefficients de détermination (R^2_{Val}) et les erreurs quadratiques moyennes ($RMSEP$) ont été calculées pour évaluer les performances du modèle sur des données non-connues par le modèle. De plus, une autre statistique, la RPD, est utilisée pour évaluer la robustesse et la pertinence du modèle pour des applications : 2,5 ≤ RPD <3,0 indique que le modèle quantitatif fait des prédictions approximatives (*screening*) ; 3,0 ≤ RPD <3,5 indique de bonnes prédictions quantitatives (*quality control*) ; 3,5 ≤ RPD <4,1 suggère de très bonnes prédictions quantitatives (*process control*) ; et RPD ≥ 4,1 indique un excellent modèle prédictif.

Le traitement des données a été réalisé sur Matlab R2019a (Massachusetts, USA).

Résultats et discussion

Description des spectres

La Fig. 1 montre des spectres du bois brut (BRU), et des bois imprégnés avec différents produits d'imprégnation (GRI, MAR, VER, 3V3 et XYL).

En proche infrarouge, les spectres sont constitués d'une multitude de superpositions de bandes d'absorption (Zahri 2007). Ces bandes proviennent des modes de vibration des liaisons chimiques (harmoniques, combinaisons). Sur les spectres BRU, 3V3 et XYL, des motifs de type méthyl, méthylène sont observables vers 972 nm et 942-955 nm ; vers 969-980 nm, et 985-1006 nm, ce sont des motifs liés à la bande de l'eau (motifs de type alcool). Dans le cas des

produits GRI, MAR, VER, les motifs spectraux semblent masqués. En effet, les intensités relatives sont très faibles en comparaison avec les spectres de BRU. Cela semble provenir de la composition des produits de préservations inorganiques (MAR, VER), et de la couleur sombre de ces mêmes produits (GRI, MAR, VER) (Feldhoff et al. 1998, So et al. 2004, Taylor et Lloyd 2007). Des tests statistiques complémentaires confirment cette observation (Résultats en cours de publication).

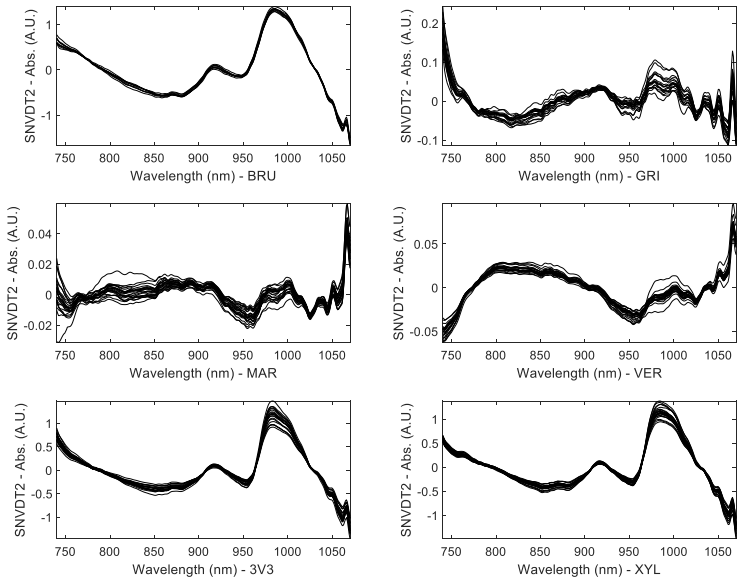


Fig. 1 : Spectres du bois brut (BRU), et des bois imprégnés avec différents produits d'imprégnation (GRI, MAR, VER, 3V3 et XYL). Le prétraitement appliqué sur ces spectres est une combinaison de deux prétraitements « SNV + DT2 ». Ces prétraitements permettent de centrer et normaliser les spectres, en plus de corriger leur ligne de base.

Performance des modèles

L'étalonnage a été réalisé à l'aide d'un modèle de régression PLS pour les différents produits de préservation du bois (GRI, MAR, VER, 3V3, et XYL). Les statistiques des modèles sont présentées dans le Tab. 2. Dans le Tab. 2, seuls les résultats issus des meilleurs modèles sont présentés :

- Le *Preprocessing* a un effet non négligeable sur les performances des modèles. En effet, différents *Preprocessing* permettent d'optimiser l'étalonnage pour chaque produit de préservation
- Pour chaque produit de préservation, l'étendu des taux de rétention, sélectionnée par l'algorithme Duplex, pour être modélisée (y_X) est très homogène
- Pour chaque produit de préservation, les coefficients de détermination sont assez élevées (R_X^2 > 0,8). Cela permet d'observer qu'il y une bonne adéquation entre les valeurs des taux de rétention observées, et celles prédites par le modèle
- Pour chaque produit de préservation, les erreurs quadratiques moyennes ($RMSEX$) sont relativement faibles en comparaison avec les valeurs modélisés (y_X)
- De plus, les valeurs de R_X^2 et $RMSEX$ sont très homogènes, ce qui permet de savoir que le modèle est assez robuste
- Les valeurs de RPD permettent de connaître la pertinence du modèle pour des applications. On s'aperçoit que plus la concentration en substances actives est élevées, plus le modèle est performant (GRI > 3V3 > MAR > VER > XYL). Et cela, indépendamment de la composition des produits de préservation du bois (organique ou inorganique). Il en découle que certains

modèles peuvent être utilisées avec de très bonnes performances quantitatives (pour par exemple, du *process control*)

Tab. 2 : Statistiques des modèles pour l'étalonnage des différents taux de rétention.

	Pre-processing	LVs	y_{Cal} (kg/m^3)	y_{Val} (kg/m^3)	R^2_{Cal}	R^2_{CV}	R^2_{Val}	$RMSEC$ (kg/m^3)	$RMSECV$ (kg/m^3)	$RMSEP$ (kg/m^3)	RPD
GRI	SG1	5	1,23 – 19,75	1,25 – 18,95	0,97	0,93	0,96	0,96	1,53	1,06	3,72
MAR	DT2	8	13,75 – 108,75	14,63-110,44	0,94	0,90	0,94	7,53	10,53	7,51	3,09
VER	SG1	6	13,90 – 73,10	14,53 – 63,74	0,92	0,90	0,92	4,57	6,73	4,63	2,45
3V3	SNV	6	0,16 – 2,44	0,15 – 2,20	0,80	0,91	0,84	0,29	0,19	0,26	3,39
XYL	SG1	7	0,08 – 1,05	0,08 – 1,10	0,91	0,74	0,90	0,10	0,17	0,10	1,97

Preprocessing indique le prétraitement qui a été appliqué aux spectres pour un produit de préservation donné ; y_X représente l'étendu des taux de rétention utilisé dans les sous-jeux de calibration et validation ; LVs est le nombre de variables lantentes utilisées dans le modèle de régression PLS ; R^2_X est le coefficient de détermination calculé entre les valeurs des taux de rétention observés et prédites par le modèle ; $RMSEX$ représente les erreurs quadratiques moyennes ; RPD représente la robustesse et la pertinence du modèle

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était de montrer le potentiel d'un spectromètre proche infrarouge « low-cost » (*SCiO*, Consumer Physics) pour quantifier les taux de rétention pour des produits de préservation organiques ou inorganiques. Il a été démontré que cet objectif peut être atteint grâce à l'analyse de données multivariées, et que les modèles ont de meilleures performances quand la concentration des substances actives des produits de préservation sont élevées. Ces résultats sont encourageants, et le prochain objectif sera de comparer les performances du *SCiO* avec un appareil de paillasse qui servira de référence.

Références

Feldhoff R., Huth-Fehre T., Cammann K. (1998) Detection of Inorganic Wood Preservatives on Timber by Near Infrared Spectroscopy, Journal of Near Infrared Spectroscopy, 6(A), pp. A171–A173. doi: 10.1255/jnirs.189.

So, C. L. et al. (2004) 'The application of near infrared (NIR) spectroscopy to inorganic preservative-treated wood', Wood and Fiber Science, 36(3), pp. 329–336.

Taylor A., Lloyd J. (2007) Potential of near infrared spectroscopy to quantify boron concentration in treated wood, Forest Products Journal, 57(1–2), pp. 116–117.

Zahri S. (2007) Analyse quantitative et qualitative des substances chimiques responsables des durabilités naturelle et conférée des bois de chêne européen (Quercus robur et Quercus petraea) et de pin maritime (Pinus pinaster) par la spectroscopie dans le proche infrarouge (http://www.theses.fr/2007PAUU3024).

Éléments finis pour la modélisation hygromécanique des panneaux de bois.

Colmars Julien[1], Dureisseix David[1], Montaigne Rémi[2]

[1]Univ Lyon, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, LaMCoS, F-69621, France
[2]INSA Lyon, département Génie Mécanique
julien.colmars@insa-lyon.fr

Mots clefs : coque ; solide-coque ; multicouches ; gradients hydriques ; panneaux peints ; simulation ; éléments finis.

Contexte

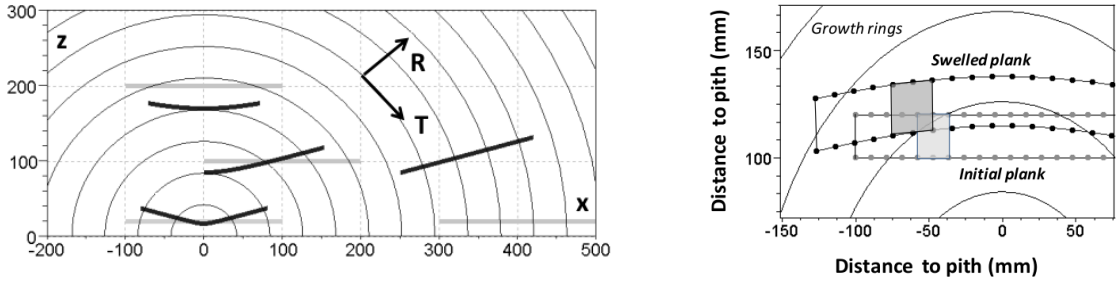
La simulation mécanique des structures à base de panneaux de bois pose quelques difficultés numériques. La prise en compte de l'orthotropie cylindrique du matériau, la présence éventuelle de gradients d'humidité dans l'épaisseur (due à des conditions aux limites asymétriques - panneaux peints, panneaux d'isolation, etc.-), et les couplages hygromécaniques sont à l'origine de comportements spécifiques au bois. Lorsqu'il est utilisé sous forme de panneaux (minces ou épais), l'argument géométrique devrait nous pousser à utiliser des modèles de coques (élément finis par exemple).

Or les particularités du matériau bois, notamment la rotation du repère matériel (liée à la croissance du bois dans l'arbre) couplée au retrait-gonflement, imposent des déformations que l'on observe difficilement dans la plupart des coques, qu'il s'agisse de coques orthotropes, multicouches, ou même multimatériaux. Pour ces raisons, le choix d'éléments volumiques paraîtra en général plus raisonnable aux utilisatrices et utilisateurs d'éléments finis. Faut-il pour autant abandonner l'utilisation d'éléments de coques pour ces applications ?

Dans cette contribution nous proposons de revenir sur quelques problèmes (et solutions associées) liés à l'utilisation d'éléments de coque pour la modélisation de panneaux de bois. Nous présenterons deux méthodes : d'une part l'utilisation d'un élément *discrete shear triangle* (DST) adapté au cas d'un panneau de bois, et d'autre part l'utilisation d'un élément de solide-coque (SB7γ19). Ces deux éléments seront utilisés pour discuter le cas (d'apparence assez banal) d'une planche durant un séchage...

Les éléments de coque et la cinématique du bois

Le retrait-gonflement du bois dans un repère orthotrope cylindrique engendre des transformations que l'on ne rencontre pas dans les autres matériaux orthotropes. Sur la Fig. 1a issue de Colmar (2011), nous montrons les transformations au séchage de planches prélevées à différents endroits du plan transverse (dosse, quartier, faux-quartier). La Fig. 1b montre que le retrait-gonflement (à humidité homogène) engendre du cisaillement transverse non négligeable dans la planche. Les modèles de coques présentés dans la suite prennent en considération ce cisaillement transverse.



(a) (b)

Fig. 1 : D'après Colmar (2011) (a) retrait de différentes planches après séchage suivant leur prélèvement dans la grume, solution analytique en déplacements lors d'un séchage correspondant à une variation du taux d'humidité de 10 %, avec des coefficients de retrait radial et tangentiel de 0.15 et 0.3 %/% respectivement ; planches initialement plates (gris) et déformées amplifiées 10 fois (noir). (b) détail du comportement dans l'épaisseur sur une dosse.

Élément de Mindlin pour les panneaux de bois

Des éléments de Mindlin permettant d'avoir des gradients d'humidité dans l'épaisseur ont été développés dans Colmar (2011). Ces éléments de coque avec cisaillement transverse permettent de simuler la flèche d'une dosse lors d'une variation d'humidité homogène, et de retomber sur la solution analytique présentée précédemment.

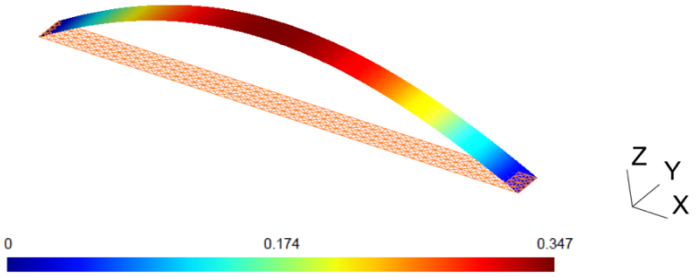


Fig. 2 : Simulation de la flèche (en mm) d'une dosse par un élément de coque de Mindlin. Les dimensions de la planche sont de (100 mm, 5 mm, épaisseur 20mm).

Élément de solide-coque

De nombreux travaux sur les solides-coques ont été proposés ces dernières années. A la suite de Bassa et al. (2012), Xiong et al. (2018) ont proposé un élément de solide-coque intéressant pour notre application : le SB7γ19 est un élément prismatique à 7 nœuds (6 nœuds sommets et 1 nœud central) et 19 degrés de libertés (18 d.d.l de déplacements aux nœuds et 1 d.d.l supplémentaire sur le nœud central) (Fig. 3). Le rôle du nœud central et du d.d.l associé est de fournir un déplacement quadratique dans l'épaisseur, et donc une variation de contrainte linéaire dans l'épaisseur, permettant de sortir de l'hypothèse des contraintes planes. Un autre point intéressant de cet élément est qu'il dispose de plusieurs points d'intégration dans l'épaisseur ; dans nos travaux ces points d'intégration sont utilisés pour calculer le repère matériel local et pour distribuer des gradients d'humidité dans l'épaisseur.

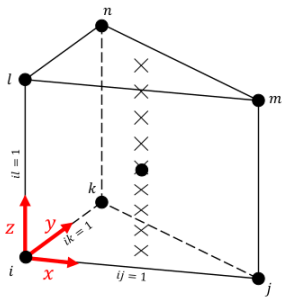


Fig. 3 : géométrie de l'élément SB7γ19 (nœuds et points d'intégration)

L'élément SB7γ19, validé chez Xiong et al. (2018) pour des matériaux élastiques homogènes, a été étendu à des applications sur le matériau bois. L'implémentation actuelle sous MatLab permet désormais : la prise en compte d'un matériau hétérogène avec la rotation du repère local (calculé pour une position du cœur de l'arbre) ; la prise en compte d'un chargement hygroélastique (sur le modèle d'une loi thermoélastique). La Fig. 4 montre une première simulation d'un cas de retrait-gonflement pour une planche prélevée sur dosse.

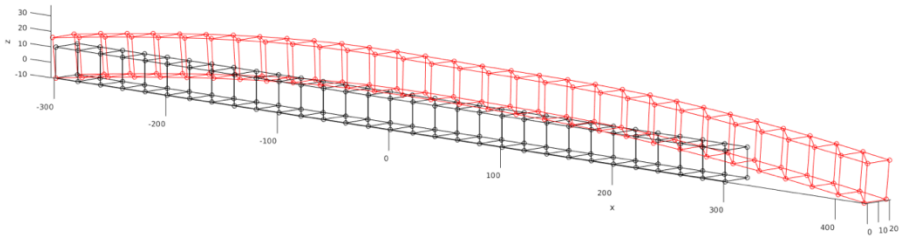


Fig. 4 : calcul de flèche sur dosse par un élément de solide-coque.

Conclusion

Les éléments de coque et de solide-coque peuvent être adaptés aux calculs de structure utilisant des panneaux de bois à condition d'implémenter (comme dans les éléments volumiques) la rotation locale du repère matériel et la prise en compte de gradients d'humidité dans l'épaisseur. Ces éléments doivent être nécessairement compatibles avec des cinématiques induisant des cisaillements transverses importants.

La présente communication se focalisera les performances comparées des éléments de coque et de solide coque pour ce type d'application.

Références

Colmars, J. (2011) Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patrimoine culturel. Thèse de l'Université Montpellier II, HAL Id: tel-00765961, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00765961

Xiong H., Guzman Maldonado E., Hamila N., Boisse P. (2018) A prismatic solid-shell finite element based on a DKT approach with efficient calculation of through the thickness deformation, Finite Elements in Analysis and Design, 151 18–33, https://doi.org/10.1016/j.finel.2018.08.003.

Bassa B., Sabourin F., Brune M. (2012) A new nine-node solid-shell finite element using complete 3D constitutive laws, Int. J. Numer. Meth. Eng. 92 (7) 589–636. https://doi.org/10.1002/nme.4318

Session Posters B

Posters - Exposés flash / session B

Jeudi 19 novembre > 11:00-12:00

B01	**Recherche d'Optimisation de la Méthode de Conception des "6 Chapeaux".** *Blanchard Philippe*
B02	**Etude expérimentale des paramètres de diffusion du bois.** *Asseko Ella Martian, Gril Joseph, Godi Gael, Fournely Eric, Pambou Nziengui Claude Feldman, Moutou Pitti Rostand*
B03	**Prolonging the storage of agricultural wastes by mixing with waste MDF.** *Irle Mark, Belloncle Christophe, Bonnin Estelle, Lahaye Marc*
B04	**Effet du traitement thermique sur la colophane de pin maritime : étude des changements physico-chimiques et de l'influence sur la qualité des vernis colophane - huile de lin.** *Frances Manon, Gardère Yanis, Rubini Morandise, Duret Elsa, Leroyer Léo, Cabaret Thomas, Bikoro Bi Athomo Arsène, Charrier Bertrand*
B05	**Comparaison des taux de lignine quantifiée par méthode humide classique (Klason) et par Py-GC/MS.** *Hentges David, Dumarçay Stéphane, Gérardin Philippe*
B06	**Comportement effectif de la paroi cellulaire du bois : comparaison numérique et analytique.** *Phan Nhat Tung, Auslender François, Gril Joseph, Moutou Pitti Rostand*
B07	**Nouvelles avancées dans la caractérisation de la structure du liège.** *Chanut Julie, Crouvisier-Urion Kevin, Lagorce Aurélie, Winckler Pascale, Ferret Eric, Gougeon Régis D., Bellat Jean-Pierre, Karbowiak Thomas*
B08	**Compréhension des mécanismes de la xylogénèse et de la physiologie des arbres de peuplier, de noyer et de robinier agroforestiers pour une valorisation dans la filière bois.** *Heim Lucie, Candelier Kévin, Badel Eric, Denaud Louis, Marchal Rémy*
B09	**Caractérisation de la cinétique de diffusion hydrique de bois sans défauts de feuillus.** *Hsieh Tai-Yun, Montero Cédric, Bardet Sandrine*
B10	**Caractérisation du comportement d'assemblage bois avec broches métalliques - Lois de similitude et approche expérimentale.** *Sousseau Yann, Elachachi Sidi-Mohammed, Chaplain Myriam, Faye Carole, Catterou Thomas, Garcia Patrice*
B11	**Essais de durabilité naturelle au champ de huit (8) essences de bois malagasy: comparaison des indices de conservation à 6 mois et à 60 mois.** *Razafimahatratra Andriambelo Radonirina, Ravelonanosy Harinomena Rinah, Razafinarivo Ravo Nantenaina Gabriella, Rakotovololonalimanana Herizo, Rajemison Andraina, Ramananantoandro Tahiana*
B12	**Développement d'un nouveau composite à base de déchets industriels de cuir et de colle à bois.** *Diaz Léa, Leroyer Léo, Fernani Valérie, Charrier Bertrand*
B13	**De la douglasaie aux propriétés mécaniques de poutre : le LVL.** *Frayssinhes Rémy, Girardon Stéphane, Collet Robert, Denaud Louis*
B14	**Architecture et développement territorial en Auvergne-Rhône-Alpes : le cas de la filière bois locale - HaDEcoT-Bois.** *Rodrigues-Soares David*
B15	**Contribution de la Spectroscopie Proche Infra Rouge et des méthodes chimiométriques de classification non supervisée dans la révision taxonomique des espèces de Dalbergia de Madagascar.** *Raobelina Andry Clarel, Chaix Gilles, Razafimahatratra Andriambelo Radonirina Ramananantoandro Tahiana*
B16	**La fluctuante stabilité de l'humidité des bois mis en oeuvre en Guyane.** *Landry Léo, Beauchêne Jacques*
B17	**Influence of natural potassium content on the thermal treatment of woody biomass.** *Lopes Quirino Rafael, Colin Baptiste, Lin Yu-Ying, Pétrissans Anélie, Leconte François, Chen Wei-Hsin, Pétrissans Mathieu*

Recherche d'Optimisation de la Méthode de Conception des "6 Chapeaux"

BLANCHARD Philippe

École Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
philippe.blanchard@esb-campus.fr

Mots clefs : 6 chapeaux, De Bono, méthode de conception, optimisation, innovation

Contexte et objectifs

Dans le cadre d'un PRTT (Projet de Recherche et de Transfert de Technologies), trois étudiants de l'École Supérieure du Bois (équipe PRTT-ESB, 2017 : Laura Hillou, Clément Anthoine, Valentin Lorence) ont choisi d'optimiser l'usage de la méthode de conception des *6 chapeaux* d'Edward De Bono (Hillou et al. 2017) décrite dans l'InnoBook (support de cours, Blanchard, 2017).

Modélisation

De Bono (1972) s'est toujours beaucoup intéressé aux mécanismes de pensée qui rendent l'humain créatif. Il est notamment l'auteur de la notion de *pensée latérale*. À côté de ce monument porté à la connaissance des créatifs, il imagine, çà et là, quelques méthodes simples pour faciliter la découverte d'idées neuves. La méthode des *6 chapeaux* en fait partie.

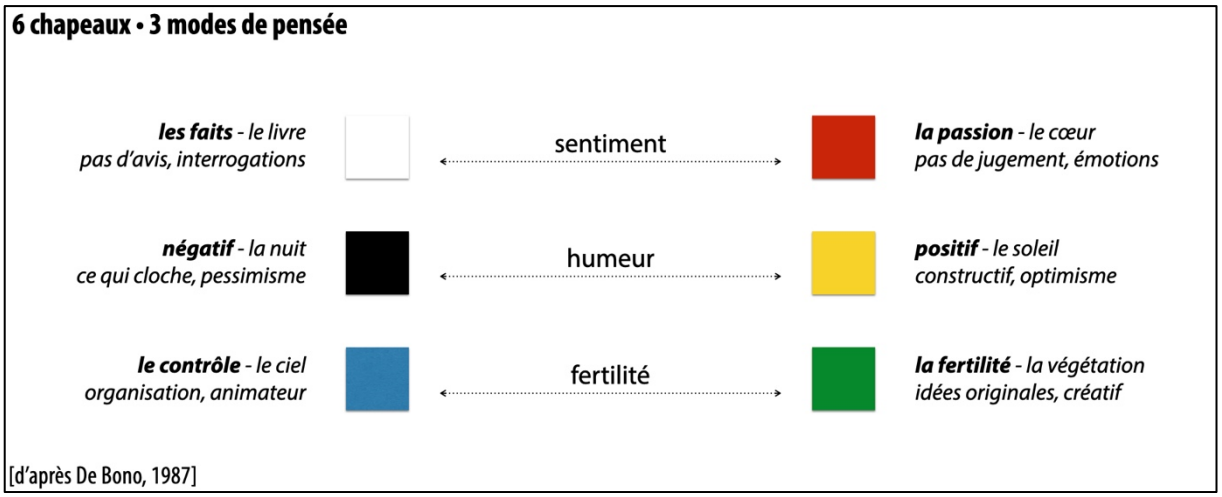


Fig. 1 : Les 6 couleurs de chapeaux et leurs caractéristiques (d'après De Bono 1987)

Selon lui (voir Fig. 1), toute séance de réflexion met en jeu trois registres différents : le *sentiment*, l'*humeur* et la *fertilité*. Chacun de ces axes est borné par deux attitudes différentes (ou couleurs de chapeaux). Ainsi, par le choix d'une association de couleur avec une posture mentale particulière, il aide à rendre visible le mécanisme global, idéal, de démarche créative. Il préfère utiliser des pensées extrêmes, globalement fécondes, plutôt qu'une position moyenne, un raisonnement médian, souvent stérile, de ces six modes de pensées. Il suggère qu'un brainstorming sollicite, à tour de rôle, chacune de ces six attitudes extrêmes. Il propose la métaphore d'une couleur (de chapeau) avec l'attitude mentale du possesseur du chapeau. Pour lui, une séance de créativité peut ressembler à six participants ayant chacun un chapeau différent. Dans ce jeu de rôle, chaque membre doit adopter les caractéristiques de la couleur de son chapeau. De nombreuses variantes de jeux existent selon les animateurs. Certains voient un

avantage à attribuer des couleurs à l'opposé des tendances naturelles des participants (pour être en forçage mental), d'autres définissent à l'avance l'ordre de passage des membres.

L'enjeu de l'étude est d'évaluer le processus optimal de succession des couleurs de chapeaux. L'équipe PRTT a minutieusement établi un enchaînement idéal (voir Fig 2).

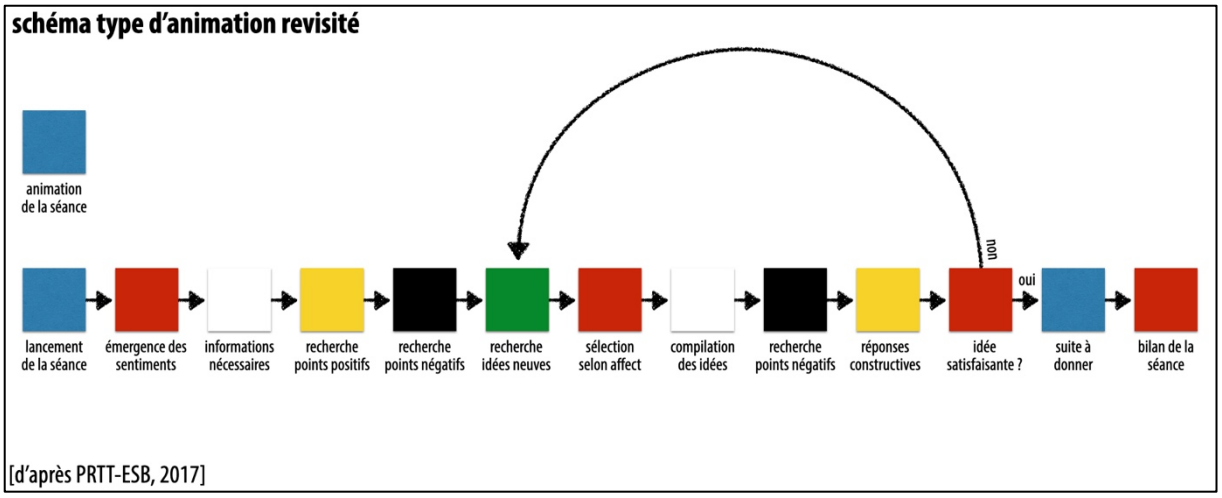


Fig. 2 : Proposition d'enchaînement de couleurs préconisé (d'après équipe PRTT-ESB, 2017)

Matériel et méthodes

Pour tester cet enchaînement, l'équipe a imaginé une campagne d'expériences (voir Fig. 3). Ce plan d'expérience *théorique* a été réduit aux seuls facteurs I (type de problématique traitée) et J (déroulement de la séance).

facteurs testables

codes	facteurs	niveaux associés
A	âge	enfants • adolescent • **adultes** • seniors
B	sexe	masculin • féminin
C	connaissance	non • **oui, sans pratique** • oui, avec pratique
D	profession	élève • **étudiant** • professionnel • indépendant
E	jour test	début semaine • milieu semaine • week-end
F	moment test	matin • après-midi • soir
G	lieu test	salle de réunion • lieu de détente • **salle de classe**
H	répartition	tables en U • tables en rangées • tables en rond • debout
I	**problématique**	**décision** • résolution problème complexe • **créativité** • **exploration** • conflit
J	**déroulement**	**sans *6 chapeaux* • *6 chapeaux* aléatoire • *6 chapeaux* prédéfini**

[d'après PRTT-ESB, 2017]

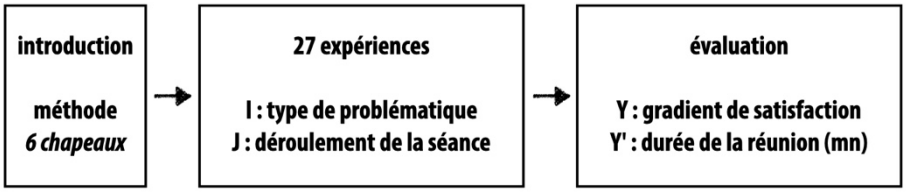
Fig. 3 : Plan d'expérience *théorique* pour les expérimentations (équipe PRTT-ESB, 2017)

Les expériences ont été menées auprès d'étudiants de l'ESB, adultes, qui avaient déjà entendu parler de la méthode des *6 chapeaux*. Dans le but de guider les participants assis autour de la table de réunion, des affiches reprenant les couleurs des six chapeaux de la réflexion et les mots caractéristiques associés ont été mis à leur disposition. Ils ont également eu des chapeaux en papier de couleur afin de pouvoir matérialiser les courants de pensée sous lesquels ils voulaient que le groupe s'exprime.

Pour chaque expérience, un animateur a guidé la séance du début à la fin. En début de séance, une explication du projet de recherche et du plan d'expérimentation réalisé a été faite afin que les participants comprennent les tenants et aboutissants de la séance. Ensuite, un rappel de la

méthode des *6 chapeaux* de la réflexion a été donné puis un sujet a été convenu avec l'ensemble du groupe (voir Fig. 4). Au cours de chaque réunion, un type de problématique précis avec une typologie spécifique de déroulement ont été utilisés. En totalité, la combinaison de trois types de problématiques avec trois déroulements de séance a été testée. L'expérimentation prend donc en compte la variation de deux facteurs à trois niveaux. Chacune des expériences a été réalisée trois fois afin de pouvoir faire une moyenne qui reflète la réalité, soit un total de vingt-sept séances tests. A la fin de chaque séance, le groupe d'étudiants a indiqué deux résultats : Y – gradient de satisfaction (voir Fig. 4) et Y' – durée de la séance.

déroulement et évaluation des expériences



valeur Y	caractéristiques
1	pas d'évolution constatée par rapport à la situation initiale
2	évolution constatée, mais pas de réponse apportée et/ou pas de plan d'action
3	évolution constatée, mais pas de réelle solution trouvée, par contre plan d'action déterminé
4	évolution constatée et solution trouvée

[d'après PRTT-ESB, 2017]

Fig. 4 : Principe d'expérimentation et évaluation (d'après équipe PRTT-ESB, 2017)

Résultats et discussion

Les résultats observés (voir Fig. 5) font suite à la mise en œuvre du plan d'expérience *réaliste* (déduit du plan d'expérience *théorique*, Fig. 3).

synthèse des résultats

essai	facteurs contrôlés		résultats					
	I : problématique	J : déroulement	Y1	Y2	Y3	Y'1	Y'2	Y'3
1	créativité	*6 chapeaux* aléatoire	4	3	3	23′	17′	22′
2	créativité	*6 chapeaux* prédéfini	4	3	4	20′	35′	30′
3	créativité	sans *6 chapeaux*	3	3	3	7′	20′	18′
4	exploration	*6 chapeaux* aléatoire	1	2	2	30′	18′	24′
5	exploration	*6 chapeaux* prédéfini	4	4	4	19′	45′	48′
6	exploration	sans *6 chapeaux*	2	3	2	6′	16′	20′
7	décision	*6 chapeaux* aléatoire	4	3	4	10′	30′	27′
8	décision	*6 chapeaux* prédéfini	3	3	2	28′	27′	15′
9	décision	sans *6 chapeaux*	2	2	2	5′	5′	7′

[d'après PRTT-ESB, 2017]

Fig. 5 : Synthèse des résultats des 27 expériences (d'après équipe PRTT-ESB, 2017)

En se reportant aux effets des paramètres et interactions de ce plan d'expérience *réaliste*, il en ressort trois faits sensibles. Les paramètres séance de *créativité* et enchaînement *prédéfini des 6 chapeaux* sont significatifs. De même, on constate deux interactions significatives. Premièrement : *exploration* d'un sujet donné avec enchaînement *prédéfini des 6 chapeaux*. Deuxièmement : prise de *décision* avec enchaînement *aléatoire des 6 chapeaux*.

Les limites de l'étude portent essentiellement sur la représentativité des échantillons choisis. D'autre part, le nombre d'expériences, bien que conséquent, reste insuffisant pour pouvoir généraliser ces résultats.

Conclusion et perspectives

L'enjeu de ce PRTT était d'étudier l'optimisation l'usage de la méthode de conception des *6 chapeaux* d'Edward De Bono. C'est à dire, quel processus d'animation utiliser : ordre aléatoire d'expression des chapeaux, ordre prédéfini par l'équipe PRTT ou absence d'utilisation de cette méthode. La Fig. 6 présente la synthèse des enseignements tirés de l'expérimentation.

guide d'utilisation

combinaisons	sans *6 chapeaux*	*6 chapeaux* aléatoire	*6 chapeaux* prédéfini
créativité	OK si autre méthode	possible	conseillé
exploration	déconseillé	possible	conseillé
décision	déconseillé	conseillé	possible

[d'après PRTT-ESB, 2017]

Fig. 6 : Recommandations d'usage d'enchaînement des *6 chapeaux* selon le contexte (d'après équipe PRTT-ESB, 2017)

L'équipe PRTT a produit un poster qui résume tous ces apports. Elle entend ainsi contribuer à répandre un usage raisonné de cette méthode de conception.

Références

De Bono E. (1972) La pensée latérale, Paris, Stock.

De Bono E. (1987-2017) Les 6 chapeaux de la réflexion, Paris, Eyrolles.

Hillou L., Anthoine C., Lorence V. (2017) Optimisation de la méthode des 6 chapeaux. PRTT-ESB.

Etude expérimentale des paramètres de diffusion du bois

ASSEKO ELLA Martian[1], GRIL Joseph[1,2], GODI Gaël[1], FOURNELY Eric[1], PAMBOU NZIENGUI Claude Feldman[1,3], MOUTOU PITTI Rostand[1, 4]

[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, Clermont Ferrand, France
[2]Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, Clermont Ferrand, France
[3]Ecole polytechnique de Masuku (EPM-USTM)
[4]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
martian.asseko_ella@etu.uca.fr

Mots clefs : cellule de force ; coefficient de diffusion ; dispositif expérimental ; solution saline ; teneur en eau

Contexte et objectifs

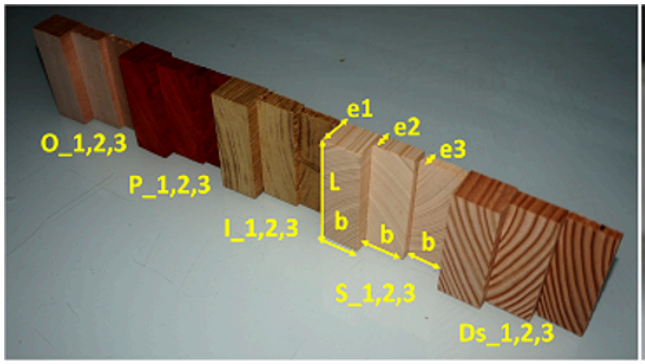
Le bois est un matériau hygroscopique et ses propriétés mécaniques et physiques dépendent fortement de son état hydrique. L'eau y est présente sous forme d'eau libre, à l'état liquide ou vapeur dans les lumens, et d'eau liée dans les parois. Dans le bois, en dessous du point de saturation des fibres (psf), les phénomènes de transferts de masse se caractérisent par la migration de l'eau liée et de la vapeur d'eau. Au cours de ce processus de migration de l'eau, il est donc important d'appréhender les phénomènes mis en jeu, notamment le processus de diffusion hydrique. Une bonne caractérisation du processus de diffusion doit passer par la mise au point de techniques expérimentales simples et fiables. A ce jour il existe plusieurs techniques et méthodes expérimentales qui permettent de suivre l'évolution de l'humidité dans le bois. Certaines de ces techniques, nécessitent parfois de sortir le bois hors de l'enceinte et de le peser sur une balance pour estimer sa masse, ce qui peut parfois perturber l'histoire hydrique des éprouvettes testées à l'exemple des travaux de Manfoumbi (2012).

La technique expérimentale proposée dans ce document est une approche améliorée qui permet de réaliser plusieurs mesures sur les éprouvettes sans perturber l'état hydrique du système dans lequel sont placées les éprouvettes. Il permet également de maintenir les conditions hydriques avec très peu de variation de l'humidité relative. Afin de tester la fiabilité du dispositif, nous avons réalisé des essais de diffusion sur quelques essences tropicales et tempérées.

Matériels et méthodes

Les applications sont faites sur des éprouvettes de 3 feuillus tropicaux : okoumé (O), padouk (P), iroko (I), et 2 résineux tempérés : sapin pectiné (S), douglas (Ds). Ces éprouvettes sont réparties dans 2 boites d'essais (boite j=1,2), régulées en humidité relative (HR) au moyen de solutions salines, et elles-mêmes placées dans une pièce régulée en température (T) à 20°C et environ 43% HR. Dans chaque boite, des tests sont réalisés sur des éprouvettes de bois d'épaisseurs différentes : e1=20 mm (type 1), e2=10mm (type 2, e3=5 mm (type 3) (Fig.1).

Pour chaque essence, l'épaisseur des éprouvettes est orientée suivant la direction longitudinale (L) ou transverse (RT). Afin de forcer la diffusion dans le sens L ou RT, nous avons recouvert les 4 autres faces par plusieurs couches de ruban adhésif en aluminium (Fig.2). Sur l'une des faces supérieures des éprouvettes nous avons laissé un espace pour fixer un fil de pêche à l'éprouvette.



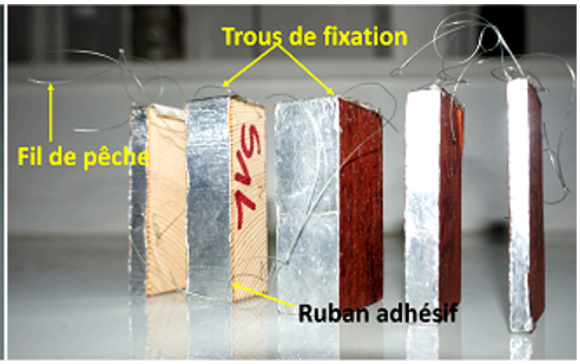


Fig. 1 : Configuration des éprouvettes testées Fig. 2 : éprouvettes après la mise du ruban

Fig. 3 : Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en 2 boites de plexiglass de dimensions 45x20x20mm et d'un bras mobile équipé d'une cellule de force (Fig.3). Cette dernière permet de mesurer un signal électrique, par la suite converti en masse via l'équation (1). L'estimation de la masse m (en g) d'une éprouvette se fait par conversion du signal électrique L_{ep} (en mV) d'une éprouvette, connaissant les signaux électriques L_p et L_g de deux écrous de calibration, mesurés au même moment, et les masses étalons m_p et m_g de ces mêmes écrous, mesurés au préalable avec une balance de précision :

$$m(g) = m_p + \frac{m_g - m_p}{L_g - L_p} \cdot (L_{ep} - L_P) \qquad (1)$$

Cette procédure permet de s'affranchir des dérives éventuelles du capteur de force, en le recalibrant à chaque fois. Les boites sont dotées de capteurs thermo hygrométriques pour le suivi de HR et T. Elles disposent également de ventilateurs pour homogénéiser l'ambiance, que l'on arrête durant les mesures. Une grille métallique empêche les éprouvettes de tomber dans le bac de solution saline. Les éprouvettes sont retenues par le fil de pêche sortant par des trous de 10 mm de diamètre sur la face supérieure de la boite, refermés avec des bouchons en silicone de forme conique qui bloquent le fil. Le bouchon de chaque éprouvette n'est enlevé que le temps de sa mesure de masse, ce qui réduit considérablement les échanges d'air entre l'intérieur de la boite et la pièce. L'évolution de la teneur en eau de l'éprouvette est donnée par :

$$w(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \tag{2}$$

où m_0 est la masse anhydre, mesurée après passage dans une étuve à 103°C et $m(t)$ est la masse de l'éprouvette mesurée à l'instant t. Si l'on néglige la résistance aux transferts de masse. La méthode adoptée est celle de la détermination de la pente de la partie linéaire de la courbe expérimentale (Agoua 2001). Par la suite nous avons appliqué l'équation suivante pour déduire D :.

$$w^*(t) = \frac{4}{e}\sqrt{\frac{D}{\pi}t} \tag{3}$$

avec $w^*(t) = (w(t) - w_0)/(w_{eq} - w_0)$ la teneur en eau adimensionnelle dans le cadre d'une phase d'humidification, w_0 est la teneur en eau initiale et w_{eq} la teneur à l'équilibre.

Résultats et discussions

Dans un premier temps nous avons voulu vérifier la capacité du dispositif à maintenir l'humidité relative et la température des boites constantes. Ainsi la Fig. 4 et la Fig. 5 présentent l'évolution sur 5 jours de T et HR dans les boites j1 et j2. On peut voir que les valeurs de HR oscillent avec de faibles écarts-types autour des valeurs que propose par la norme NF EN ISI 483. On observe également de légères variations de la température autour de 22°C, qui ont très peu d'incidence sur la valeur de HR à atteindre. En effet, selon la norme NF EN ISI 483 que l'on soit à T=20°C ou à T=25°C on trouvera sensiblement les mêmes valeurs de HR avec les solutions salines que nous avons utilisées. De ce fait les variations de T n'ont pas d'effet sur HR à atteindre. Cela se confirme avec les résultats de HR mesurée que présente le Tab.1 où les valeurs moyennes de HR mesurée sont très proches de celles prédites par la norme.

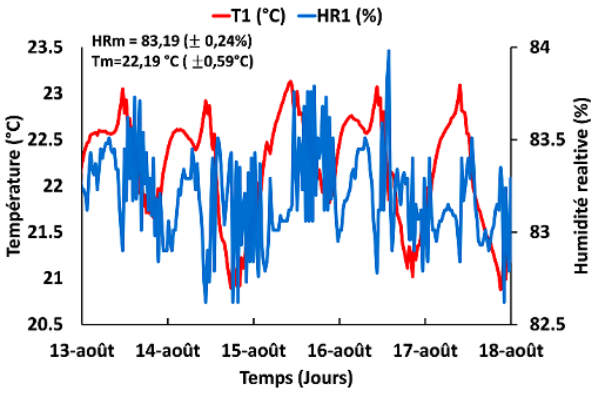


Fig. 4 : Evolution de T et HR dans la boite 1

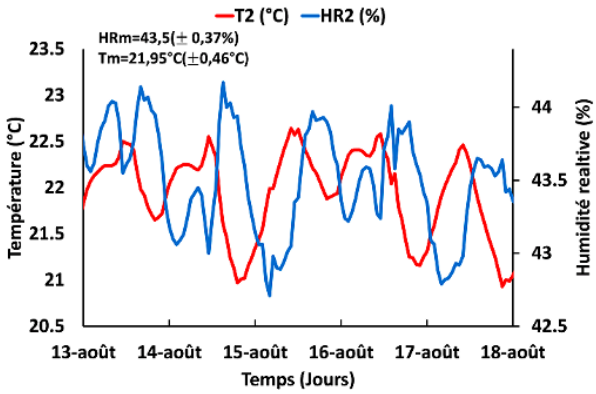


Fig. 5 : Evolution de T et HR dans la boite 2

Tab.1 Solutions aqueuses utilisées et humidité relative de la boite à T=20°C

Solutions aqueuses	HR (%) NF EN ISO 483	HR(%) mesurée
Carbonate de potassium (K_2CO_3)	43,2	42,02% (±0,40)
Bromure de sodium (NaBr)	57,6	57,81% (±1,05)
Chlorure de sodium (NaCl)	75,3	73,47 % (±1,28)
Chlorure de potassium (KCl)	85	82 ,08% (±1,14)

Les Fig. 6 et Fig. 7 présentent les courbes expérimentales des teneurs en eau des éprouvettes d'okoumé et de sapin des 3 épaisseurs testées dans le sens transverse (RT) et longitudinal (L)

sous 3 paliers de HR (0-43,2 ; 43,2-57 ; 57-73,4 %). Les courbes présentent les trajectoires typiques de la cinétique de diffusion de l'eau dans le bois dans les 2 directions considérées.

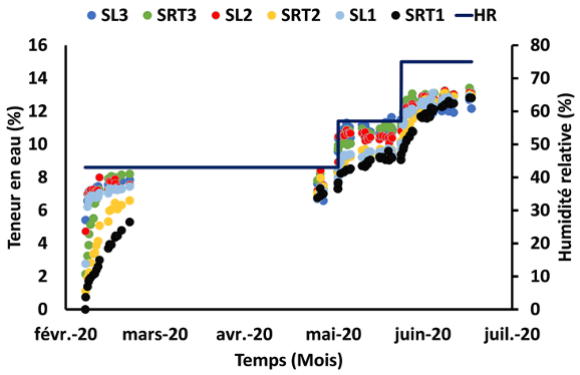


Fig. 6 : Evolution de la teneur en eau de l'okoumé

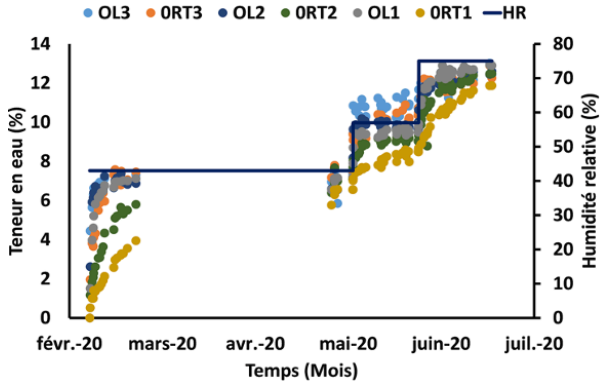


Fig. 7 : Evolution de la teneur en eau du sapin

Le Tab. 2 présente les coefficients de diffusion obtenus sur les éprouvettes de 10 mm d'épaisseur des 5 essences testées dans le sens RT et L. On peut voir que la diffusion est plus rapide dans le sens longitudinal et que l'ordre de grandeur des coefficients de diffusion reste le même pour toutes les essences testées. Il apparaît également que les changements de HR n'ont pas d'incidence majeure sur les coefficients de diffusion. On peut aussi remarquer que le padouk est l'essence qui diffuse le plus lentement parmi les essences testées, ce qui peut s'expliquer par sa densité plus élevée, mais également par l'action de ses extractibles. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de plusieurs auteurs dans la littérature (Jamaaoui, 2017 ; Manfoumbi, 2012).

Tab. 2 : Coefficients de diffusion des éprouvettes de 10mm d'épaiseurs en D ($m^2 .s^{-1}$)

HR	Longitudinal				
	Okoumé	Padouk	Sapin	Douglas	Iroko
0-43%	2,04E-10	3,17E-11	2,33E-10	1,20E-10	2,05E-10
43-57,7%	1,57-10	3,36E-11	1,60E-10	1,67E-10	1,30E-10
57,7675%	2,77E-10	3,07E-11	4,50E-10	4,69E-10	1,17E-10
HR	Transverse				
	Okoumé	Padouk	Sapin	Douglas	Iroko
0-43%	1,27E-11	1,79E-12	1,59E-11	1,96E-11	1,13E-11
43-57,7%	2,38E-11	8,77E-12	4,67E-11	3,25E-11	2,80E-11
57,7675%	1,28E-11	9,84E-12	1,45E-11	1,27E-11	3,27E-11

Références

Jamaaoui A. (2017) Durabilité et comportement hygroscopique du Douglas en relation avec son patrimoine génétique. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 155 p.

Agoua E, Zohoun S, Perré P. (2001) A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water on wood in unsteady-state conditions: determination of the best fitting method by numerical simulation. International Journal of Mass Transfert, 44. 14 p.

Manfoumbi Boussougou N. (2012) Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement. Thèse de doctorat, Université de limoges. 296 p.

Prolonging the storage of agricultural wastes by mixing with waste MDF

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

[1] Ecole Supérieure du Bois, LIMBHA, Nantes, France
[2] INRAE, Paroi Végétale et Polysaccharides Pariétaux, Nantes, France
mark.irle@esb-campus.fr

Keywords: MDF; waste; storage; biorefinery

Introduction

Both Ecole Supérieure du Bois and INRAE are partners in a Horizon 2020 project called FLEXIBI[2], which is financed by the ERANET named FACCE SURPLUS. The overall aim of FLEXIBI is investigate "*the use of agriculture, landscaping, agro-food industries and post-consumption plant biomass waste from periurban areas as feedstocks for Small scale Flexi-feed Biorefineries (SBF)*". The idea is to use SBF to extract valuable compounds from these wastes.

A major challenge for any biorefinery, even a small-scale one, is that it must operate all year round, but, agricultural residues are generated seasonally and then tend to biodegrade very rapidly. Certainly, the tomato and cucumber wastes studied in this project show significant changes, caused by biodegradation, within a few days. Biodegradation can be slowed, or even stopped, if the residues are dried. Drying, however, is energy intensive and, therefore, cost prohibitive.

The volume of MDF waste generated around the world is increasing exponentially due to the rapid expansion of installed manufacturing capacity and the relative short lifespans of products made with MDF (Irle, et al., 2018). Rather worryingly, there is, currently, no commercially viable method of recycling MDF. As a consequence, much of it is burnt for energy. Data collected on the moisture content of waste wood supplied to an incinerator over a 9-years period indicates a moisture content of around 23% (Edo *et al.,* 2016). MDF is principally used for in-door products (EPF, 2020) and, consequently, it is reasonable to assume that waste MDF would have a similar or lower moisture content. In addition, it is available all year round.

This short paper presents some results on the mixing of cucumber wastes with waste MDF.

Materials and methods

Waste MDF was obtained directly from the FINSA factory based in Morcenx, France. A range of panels with thicknesses varying from 15-22 mm were used. The panels were cut into strips 7 mm wide, then passed through a garden waste chipper, followed by a laboratory grinder (Resch) without a screen (see Fig. 1). The distribution of particles was found to be 18.2% retained on an 8 mm sieve, 74.7% on a 4 mm sieve and 7.1% in the bottom pan.

[2] Information about the project can be found at: https://cit.kuleuven.be/biotec/flexibi-home/

Fig. 1: The range of particle sizes after passing 7 mm strips of MDF through a garden chipper and then a laboratory grinder (right: 8 mm sieve, middle: 4 mm sieve, left: bottom pan)

The cucumber waste was collected directly from Olivier S.C.A., Nantes. The waste was pressed to reduce its water content to approximately 84%, see Fig. 2. Then the pressed waste was mixed with the appropriate weight of MDF chips to give the desired water content of the mixture of 15%, 20%, 25% or 33%. The mix was formed into a mattress and pressed at approximately 8 MPa. Finally, the pressed cake was then placed in a plastic box for long-term storage. Although the boxes are not completely sealed the water content was found to fall by only 16% over an 11 months period, i.e. the 33% water content mixture still had a water content of 27.7%. A type K thermocouple was placed in the centre to allow temperature measurement of the mixture.

Fig. 2: The main steps of making a “cake” of MDF chips and cucumber waste.

From time to time, 35-40 g samples were taken from the box in order to measure the water content of the MDF, the cucumber and the mix as whole. Some of the sample was separated by hand to obtain a sub-sample of MDF and cucumber waste; the remaining sample was also dried at 103 °C for 4-9 hours.

Results

Fig. 3 shows how the water content of the cucumber and MDF wastes changed when mixed together and stored in plastic boxes. For clarity, only the two extremes are shown, i.e. 15% and 33% water contents. There is quite a lot of variability in the data caused by the difficulty in separating sufficient quantities of cucumber waste from the MDF. Consequently, the trend of water content change is highlighted by lines of best fit based on proportional decrease/growth of the form:

$$wc = wc_i - \frac{k_1}{k_2}(1 - e^{-k_2 t})$$

where: wc = water content, wc_i = initial water content, k_1 and k_2 are constants, a t = time in days.

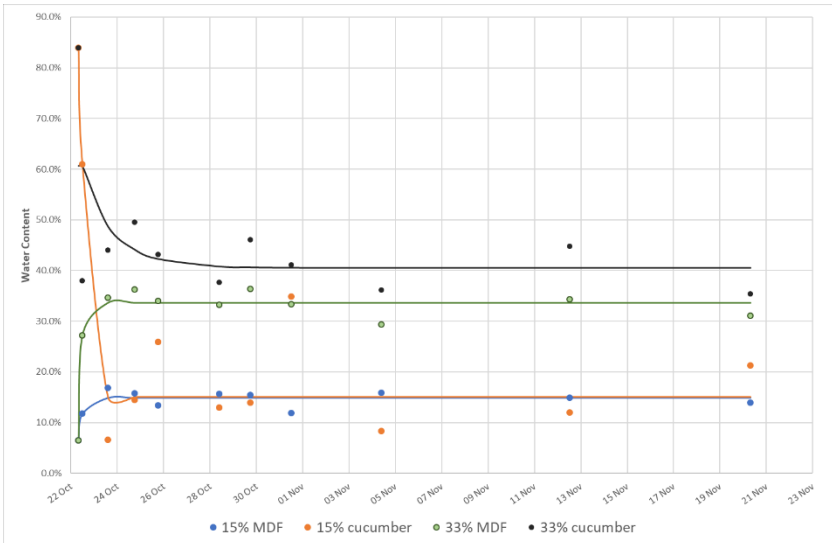


Fig. 3: The changes in water content of the cucumber and MDF wastes as a function of time for the mixtures having initial water contents of 15% and 33%.

The trend lines clearly show that the greatest change in water contents occurred as a result of the pressing step. Certainly, this is so for the 15% water content mix as both the decrease in water content of the cucumber and the increase in water content of the MDF reached stable levels within 2 days of storage. Even for the 33% water content mixture, over 80% of the changes occurred within the first 2 days.

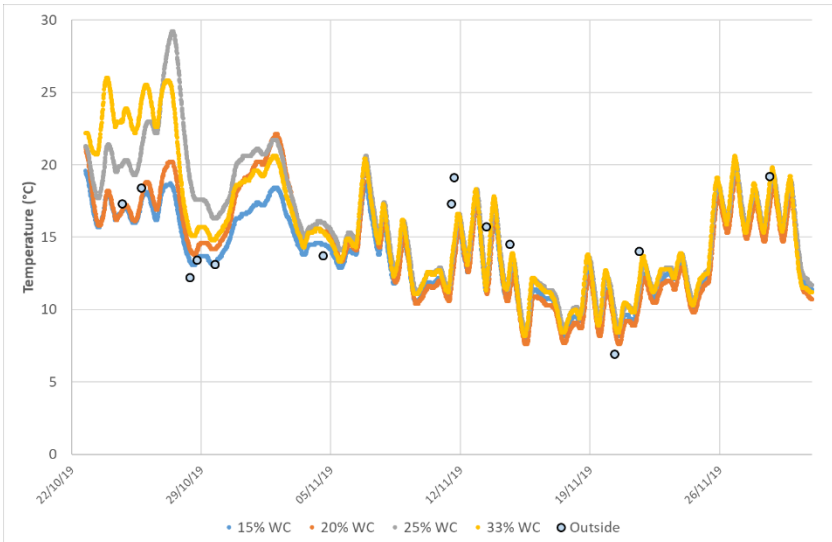


Fig. 4 : The temperatures recorded in the middle of the samples. The “Outside” data points indicate the outdoor temperature recorded at the time of sampling.

Fig. 4 shows the temperature within the mixtures during storage. Although temperatures were recorded over almost 6 months only the first 6 weeks are shown in the graph. It would appear that the 25% and 33% mixes were warmer than the others and the ambient temperature. This could be caused by the continued metabolic processes within the cucumber and/or from metabolic processes of microbes attacking the agricultural waste. All the mixtures exhibited the

same temperatures after 2 weeks of storage. This implies that no further, significant biological changes within the mixes after this.

Visual assessment of the cucumber waste after nearly 1 year of storage indicates that the cucumber is in good condition, see Fig. 5. The water content at the end of this storage period was 28%, which is sufficient to support biological attack. One possible explanation is that the concentration of formaldehyde in the air within the box prevents decay.

Fig. 5 : The condition of the 33% water content mixture after nearly 1 year.

Conclusion

The long-term storage of high-water content agricultural residues is possible if they are mixed with low-water content waste MDF and pressed to at least 8 MPa in order to help transfer liquids between the two components.

Acknowledgments

The authors are grateful for the financial support from the “Région Pays de la Loire” council, ADEME via the ERA-NET FACCE SURPLUS that finances the FLEXIBI project (ANR-17-FASU-0002).

References

Edo M., Björn E., Persson P., Jansson S. (2016) Assessment of chemical and material contamination in waste wood fuels – A case study ranging over nine years. Waste Management 49 (2016) 311–319.

EPF (2020) Annual Report 2019-2020. European Panel Federation, Brussels, Belgium.

Irle M., Privat F., Couret L., Belloncle C., Deroubaix G., Bonnin E., Cathala B. (2018) Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF. Wood Materials Science and Engineering 14(1):19-23.

Effet du traitement thermique sur la colophane de pin maritime : étude des changements physico-chimiques et de l'influence sur la qualité des vernis colophane – huile de lin

FRANCES Manon[1], GARDERE Yanis[1], RUBINI Morandise[1], DURET Elsa[1], LEROYER Léo[1], CABARET Thomas[1], BIKORO BI ATHOMO Arsène[1], CHARRIER Bertrand[1]

[1]Xylomat, IPREM-EPCP, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Mont de Marsan
manon.frances@univ-pau.fr

Mots clefs : colophane ; formulation ; huile végétale ; pin maritime ; vernis ; traitement thermique

Contexte et objectifs

Cette étude (Frances et al., 2020) intervient dans le cadre de la thèse : Étude de la mise au point d'un vernis industriel à base de colophane et d'huile végétale, soutenue le 29 Novembre 2019. Le but de cette thèse était 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-faires anciens (Tirat et al., 2016). Nous nous sommes intéressés aux vernis employés à la fin du XVIIème et au début du XVIIIème siècles 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 et al., 2010). La thèse s'est déroulée 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).

Afin de mieux connaître la chimie de la colophane, le traitement thermique de celle-ci est le sujet de plusieurs études. Les acides abiétiques, en raison de leurs deux doubles liaisons conjuguées, subissent une isomérisation, ainsi que des réactions de décomposition et de déshydrogénation (Artaki et al., 1992). Ces modifications entraînent la formation de composés comme l'acide 15-hydroxo-déhydroabiétique, l'acide 7-oxo-15-hydroxy-déhydroabiétique et l'acide 7-oxo-déhydroabiétique (Cabaret et al., 2019; Kersten et al., 2007).

L'objectif de cette étude est de caractériser la colophane avant et après le traitement thermique à haute température (180 °C, 200 °C et 250 °C) via la calorimétrie à balayage différentiel (DSC), l'analyse thermogravimétrique (ATG), l'analyse thermomécanique (TMA) et liquide chromatographie liquide à haute performance (HPLC), puis d'évaluer l'influence de ces traitements dans les vernis huile de lin – colophane.

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), distillée selon un procédé breveté à basse pression et basse température par Biolandes. La terre d'ombre est fournie par la société Ôkhra (Roussillon, France). Elle contient du dioxyde de manganèse et de l'oxyde de fer, appelés siccatifs pour l'huile de lin.

La colophane de référence a été utilisée sans traitement thermique. La plage de température de dégradation de la colophane commence à 200 °C et se termine à environ 300 °C (Artaki et al., 1992), les températures de traitement thermique ont donc été choisies dans cette intervalle. Tous

les échantillons de colophane ont été chauffés pendant 30 minutes avec une plaque chauffante à agitation magnétique à 180 °C, 200 °C et 250 °C. Les colophanes seules sont analysées 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 analyse thermomécanique Mettler Toledo, modèle SDTA840.

Les vernis sont ensuite formulés avec de l'huile de lin, de la colophane et de la terre d'ombre et mélangés grâce à une plaque chauffante avec agitateur magnétique selon la recette du luthier Nicolas Gilles. Les formulations sont appliquées au pinceau et séchées avec des lampes UV de longueur d'onde 340 nm. 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.

Résultats et discussion

Propriétés thermiques des colophanes selon leur traitement thermique.

L'analyse thermomécanique montre une différence entre la référence et les colophanes traitées (180 °C, 200 °C et 250 °C) : plus le traitement thermique est élevé, plus le point de ramollissement est élevé, comme montré en Fig. 1.

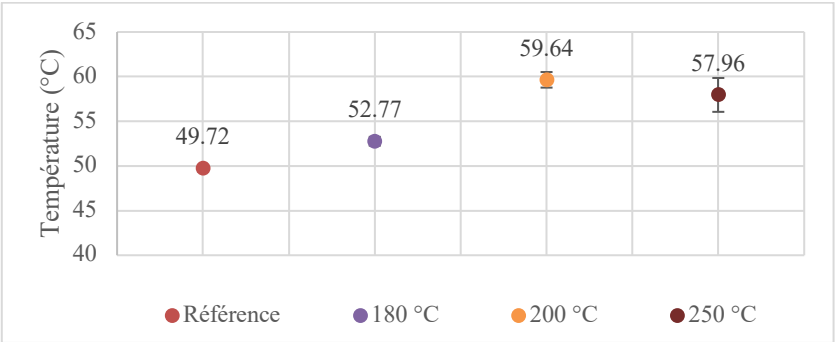


Fig. 1 : Point de ramollissement des colophanes selon leur traitement thermique mesuré par TMA. L'écart-type est calculée sur 3 mesures.

Cela concorde avec les observations de Cabaret et al. (2018), qui ont montré que la colophane chauffée à 120 °C pendant 12 heures peut avoir un point de ramollissement supérieur de 18 °C à celui de la référence. Cela peut être dû à l'évaporation de la térébenthine résiduelle et/ou à la transformation chimique de la colophane traitée thermiquement (avec des réactions d'oxydation, de déshydrogénation et d'isomérisation).

Une transition de phase, très semblable à une transition vitreuse, est mesurée par DSC pour la référence et les colophanes traitées. Les températures de transition vitreuse augmentent avec le traitement thermique. Ceci confirme les résultats obtenus sur le point de ramollissement : le traitement thermique induit un ramollissement, et donc une transition de phase, à des températures plus élevées que pour la référence.

Composition chimique des colophanes selon leur traitement thermique

Le taux résiduel de térébenthine dans la colophane a été mesuré à l'aide de l'ATG, où un isotherme à 150 °C a été réalisé pendant 20 minutes pour évaporer la térébenthine résiduelle. La térébenthine commence à bouillir à partir de 150 °C, en raison de la température d'ébullition de ses principaux composés : α-pinène entre 154 °C et 159 °C et β-pinène entre 156 °C et 166 °C. Comme attendu, il y a moins de térébenthine résiduelle après le traitement à 180 °C et plus, puisque son point d'ébullition se situe entre 150 °C et 180 °C. Les différences sont plus faibles

entre 180, 200 et 250 °C, ce qui peut s'expliquer par la difficulté d'enlever toute la térébenthine dans la colophane (Cabaret et al., 2019).

Les résultats obtenus confirment l'hypothèse d'un taux inférieur de térébenthine pour des températures de ramollissement et de transition de phase plus élevées. La température de transition vitreuse et le point de ramollissement augmentent avec le traitement thermique et ne varient pas beaucoup pour les températures de traitement élevées, 200 °C et 250 °C. Cependant, les différences observées entre les températures de transition de phase ne peuvent s'expliquer uniquement par l'évaporation de la térébenthine. En effet, le traitement thermique peut également être affecté par la composition chimique (Cabaret et al., 2018).

La composition chimique des colophanes en acide abiétique est évaluée par HPLC. Afin de comparer les différents échantillons de colophane, les surfaces des différents pics, normalisées à 100, sont calculées. Les surfaces sont présentées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Données chromatographiques des pics obtenus pour les colophanes référence et traitées thermiquement à 180 °C, 200 °C et 250 °C

Molécules	Absorption max (nm)	Surfaces de pic			
		Référence	180 °C	200 °C	250 °C
7-oxo-DHA	255.6	0	1.6±0.4	2.0±1.1	6.5±4.6
DHABA	243.5	0	0.8±0.1	1.1±0.4	1.6±0.6
DHA	225.3/252/268	0	3.8±0.4	4.5±1.7	7.0±1.6
Palustrique	268	11.4±1.8	9.9±1.8	9.5±2.0	9.0±2.5
Abiétique	240.8	84.3±1.6	85.8±3.9	81.5±2.7	73.1±7.6
Néoabietique	252	4.1±2.3	5.0±0.8	3.4±0.8	1.1±1.4

Une apparition de formes déshydrogénées et oxydées des acides abiétiques est observée dans les colophanes traitées thermiquement, mais pas dans la colophane de référence. Cela n'a jamais été observé auparavant : l'étude de Kersten et al., (2007), traitant de la composition de la colophane non traitée thermiquement montre la présence de formes déshydrogénées (DHA) dans la colophane non traitée. Le procédé utilisé dans cette étude a pu être effectué à une température plus élevée que le procédé de Biolandes, et ainsi être à l'origine de ces dégradations.

Propriétés des vernis formulés avec les colophanes traitées.

Les vernis formulés avec les colophanes ne présentent pas de différence significative sur l'épaisseur appliquée et la résistance à l'arrachement. Tous ont une très bonne résistance à l'arrachement. Des différences sont observées pour la couleur : les colophanes traitées induisent une couleur plus jaune du vernis. En effet, comme observé par HPLC, le traitement thermique des colophanes entraîne l'apparition de forme oxydée, pouvant mener à une couleur plus jaune. Une différence notable est également observée sur la brillance des films, comme montré en Fig. 2.

Cela signifie que pour obtenir un revêtement moins brillant, la colophane doit subir un traitement thermique.

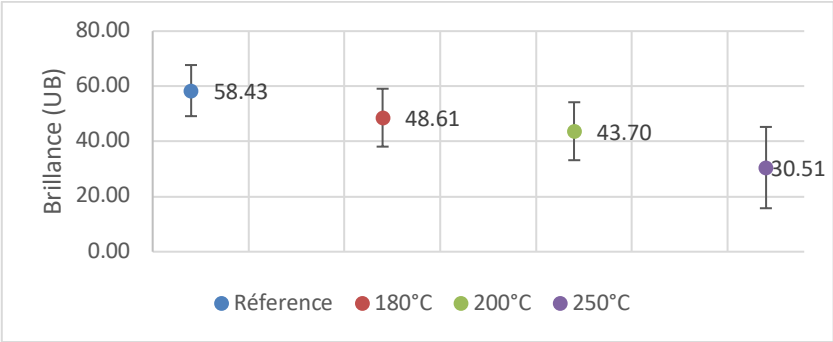


Fig. 2 : Brillance des films de vernis selon le traitement thermique des colophanes utilisées. L'écart-type est calculé avec 3 mesures.

Remerciements

Nous remercions la région Nouvelle Aquitaine et le conseil départemental des Landes pour le financement de la thèse. Nous remercions aussi le 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

Artaki I., Ray U., Gordon H.M., Gervasio M.S. (1992) Thermal degradation of rosin during high temperature solder reflow. Thermochimica acta 198, 7–20.

Cabaret T., Boulicaud B., Chatet E., Charrier B. (2018) Study of rosin softening point through thermal treatment for a better understanding of maritime pine exudation. European Journal of Wood and Wood Products 76, 1453–1459. https://doi.org/10.1007/s00107-018-1339-3

Cabaret T., Gardere Y., Frances M., Leroyer L., Charrier B. (2019) Measuring interactions between rosin and turpentine during the drying process for a better understanding of exudation in maritime pine wood used as outdoor siding. Industrial Crops and Products 130, 325–331. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.080

Echard J.-P., Bertrand L., von Bohlen A., Le Hô A.-S., Paris C., Bellot-Gurlet L., Soulier B., Lattuati-Derieux A., Thao S., Robinet L., Lavédrine B., Vaiedelich S. (2010) The Nature of the Extraordinary Finish of Stradivari's Instruments. Angewandte Chemie International Edition 49, 197–201. https://doi.org/10.1002/anie.200905131

Frances M., Gardere Y., Rubini M., Duret E., Leroyer L., Cabaret T., Bikoro Bi Athomo A., Charrier B. (2020) Effect of heat treatment on Pinus pinaster rosin: A study of physico chemical changes and influence on the quality of rosin linseed oil varnish. Industrial Crops and Products 155, 112789. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112789

Kersten P., Kopper B., Raffa K., Illman B. (2007) Rapid Analysis of Abietanes in Conifers. Journal of chemical ecology 32, 2679–85. https://doi.org/10.1007/s10886-006-9191-z

Tirat S., Degano I., Echard J.-P., Lattuati-Derieux A., Lluveras-Tenorio A., Marie A., Serfaty S., Le Huerou J.-Y. (2016) Historical linseed oil/colophony varnishes formulations: Study of their molecular composition with micro-chemical chromatographic techniques. Microchemical Journal 126, 200–213. https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.11.045.

Comparaison des taux de lignine quantifiée par méthode humide classique (Klason) et par Py-GC/MS

HENTGES David, DUMARÇAY Stéphane, GERARDIN Philippe

Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F-54000 Nancy, France
david.hentges@univ-lorraine.fr

Mots clefs : PCA ; Klason ; Py-GC/MS ; Hêtre ; Épicéa ; Chêne ; Douglas ; Sapin

Introduction

Cette étude porte sur l'utilisation d'un couplage de pyrolyse-flash, chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse. Cette technique assez récente permet d'obtenir un profil distinct des pyrolysats d'échantillons de bois afin de caractériser les polysaccharides et lignines de différentes essences, différents compartiments de l'arbre jusqu'à différents tissus ou encore les groupements chimiques ajoutés lors de modifications chimiques du bois. Ce qui démarque cette technique est sa capacité de donner des résultats fiables rapidement et à haut débit. De plus, seul une petite quantité de matière est nécessaire pour effectuer une analyse (environ 0,1 – 1 mg). Cette technique a pour ambition de remplacer à terme des techniques fréquemment utilisées tel que la lignine de Klason.

Typiquement, les produits de pyrolyse flash de la biomasse lignocellulosique sont des monomères volatils présentés dans les Tab. 1 et 2 (Patwardhan 2010).

Tab. 1 : Produits de décomposition/dépolymérisation des lignines de résineux (A) et de feuillus (B)

A

P1	Phenol	1.0
P2	Guaiacol	12.9
P3	*m/p*-Cresol	0.4
P4	3-Methylguaiacol	0.6
P5	4-Methylguaiacol	18.4
P6	4-Ethylguaiacol	3.9
P7	4-Vinylguaiacol	14.5
P8	Eugenol	4.5
P10	Isoeugenol (*cis*)	1.6
P11	Isoeugenol (*trans*)	8.3
P13	Vanillin	10.0
P14	Homovanillin	1.0
P16	Acetoguaiacone	2.9
P18	Guaiacylacetone	7.1
P20	Isomer of coniferyl alcohol	1.8
P23	Dihydroconiferyl alcohol	2.0
P24	Coniferyl alcohol (*cis*)	0.6
P28	Coniferyl alcohol (*trans*)	0.3
P29	Coniferyl aldehyde	8.2
	total (%)	100

B

P1	Phenol	0.7
P2	Guaiacol	4.6
P3	*m/p*-Cresol	0.2
P4	3-Methylguaiacol	0.4
P5	4-Methylguaiacol	4.2
P6	4-Ethylguaiacol	0.9
P7	4-Vinylguaiacol	6.0
P8	Eugenol	0.9
P9	Syringol	8.7
P10	Isoeugenol (*cis*)	0.5
P11	Isoeugenol (*trans*)	2.4
P12	4-Methyl syringol	7.7
P13	Vanillin	3.5
P15	4-Ethylsyringol	1.6
P16	Acetoguaiacone	1.2
P17	4-Vinylsyringol	8.7
P18	Guaiacylacetone	3.2
P19	4-Allyl- and 4-Propylsyringol	2.2
P20	Isomer of coniferyl alcohol	1.3
P21	4-Propenyl syringol (*cis*)	1.0
P22	4-Propenyl syringol (*trans*)	5.2
P25	Syringaldehyde	8.7
P26	Homosyringaldehyde	0.5
P27	Acetosyringone	2.4
P28	Coniferyl alcohol (*trans*)	0.1
P29	Coniferyl aldehyde	1.9
P30	Syringyl acetone	8.0
P31	Propiosyringone	1.0
P32	Sinapyl alcohol (*trans*)	0.1
P33	Sinapaldehyde	12.4
	total (%)	100

Tab. 2 : Produits de dégradation de la cellulose (à gauche) et des hémicelluloses (à droite)

Compound	Average	Standard Deviation
Formic Acid	6.6	0.23
Furan/Acetone	0.7	0.01
Glycolaldehyde	6.7	0.72
Acetic acid	0.0	0.00
2-Methyl furan	0.4	0.01
Acetol	0.3	0.02
2-Furaldehyde	1.3	0.05
2-Furan methanol	0.5	0.03
3-Furan methanol	0.3	0.00
5-Methyl furfural	0.2	0.02
2-Hydroxy-3-methyl cyclopenten-1-one	0.2	0.01
Levoglucosenone	0.4	0.03
5-Hydroxymethyl furfural	2.8	0.18
Anhydro xylopyranose	3.0	0.66
Levoglucosan – pyranose	58.8	0.27
Levoglucosan – furanose	4.1	0.09
Other Anhydro Sugars	1.4	0.04
Char	5.4	1.21
Total	92.9	2.75

All numbers are wt%.

Compound	Average	Standard Deviation
CO	2.8	0.1
CO_2	18.8	0.2
Acetaldehyde	0.7	0.1
Formic Acid	11.0	0.3
2-methyl furan	1.5	0.1
Acetic acid	1.1	0.1
Acetol	3.0	0.1
2-furaldehyde	2.2	0.1
DAXP 1	1.6	0.1
DAXP 2	7.0	0.1
Other DAXP	0.6	0.1
AXP	2.0	0.1
Other AXP	1.4	0.2
Char	10.7	0.5
Xylose	4.9	1.1
Water*	15.1	-
Total	84.3	-

All numbers are wt%.
*Calculated theoretically.

De nombreux facteurs peuvent influer sur les nature et quantités de produits formés et donc doivent être contrôlés afin de pouvoir quantifier la lignine de manière indirecte. Différentes études ont été effectuées sur les paramètres influençant le comportement des biomasses lignocellulosiques en flash-pyrolyse comme par exemple la granulométrie (Shen et al., 2009) qui agit sur la distribution des pyrolysats lorsque les particules ont une taille inférieure à 1 mm d'épaisseur. Un autre facteur important est la composition minérale du bois analysé. En effet, par exemple, une légère quantité de potassium peut suffire pour avoir un effet catalytique sur la production du levoglucosane et le dégrader davantage (Patwardhan et al., 2010)

Des tests préliminaires ont été effectués dans cette étude afin de confirmer leur effet sur les différentes essences utilisées.

Méthodologie

Les matériels biologiques utilisés dans le cadre de cette étude sont le hêtre (*Fagus Sylvatica*), le chêne (*Quercus robur*), l'épicéa (*Picea Abies*), le sapin (*Abies Alba*) et le douglas (*Pseudotsuga Menziesii*). Le duramen et l'écorce de ces essences ont été broyés et passés à travers un tamis de 0,4 mm et 0,1 mm d'épaisseur.

Les extractibles des échantillons sont éliminés grâce à l'utilisation successive de 150 mL toluène/éthanol (2v/v) pendant 7 heures suivi de 150 mL d'éthanol pendant 12 h dans un Soxhlet.

L'échantillon est séché avant et après l'extraction dans une étuve a 103°C. Finalement les échantillons sont macérés pendant une nuit dans de l'eau à 70°C.

La lignine de Klason a été déterminée par la méthode LAP, qui utilise de l'acide sulfurique à 72%.

Pour effectuer la pyrolyse, environ 0,7 mg (± 0,03) de sciure sont introduits dans un microtube en quartz bouché aux extrémités par de la laine de quartz.

Le microtube est introduit dans le pyrolyseur Pyroprobe 5200 (CDS Analytical, Inc) couplée à une chromatographie gazeuse (Clarus 580 GC, PerkinElmer) et un spectromètre de masse

(Clarus 500 MS, PerkinElmer). La pyrolyse est effectuée à une température de 550°C pendant 5s. Les pyrolysats sont transportés à travers une colonne de transfert à 280°C à l'aide d'un flux d'hélium a 75 mL/min jusqu'à un injecteur maintenu à 280°C. La séparation est obtenue grâce à un gradient de température allant de 50 à 280°C suivant un pas de temps 5 min à 50°C suivi d'une incrémentation de 4°C/min jusqu'à 240°C puis 10°C/min jusqu'à 280°C. La température finale est maintenue pendant 3,5 min pour une durée totale de l'expérience de 60 minutes. Le mode d'ionisation de la MS est l'EI avec une énergie d'ionisation de 70eV. L'analyse est effectuée sur une plage de 28-300 m/z.

Les pyrogrammes sont acquis avec le logiciel Turbomass et traités avec le logiciel open source OpenChrom afin de sélectionner de manière souple et performante les pics, les intégrer et les identifier.

Résultats

Analyse de l'effet des minéraux et de la granulométrie

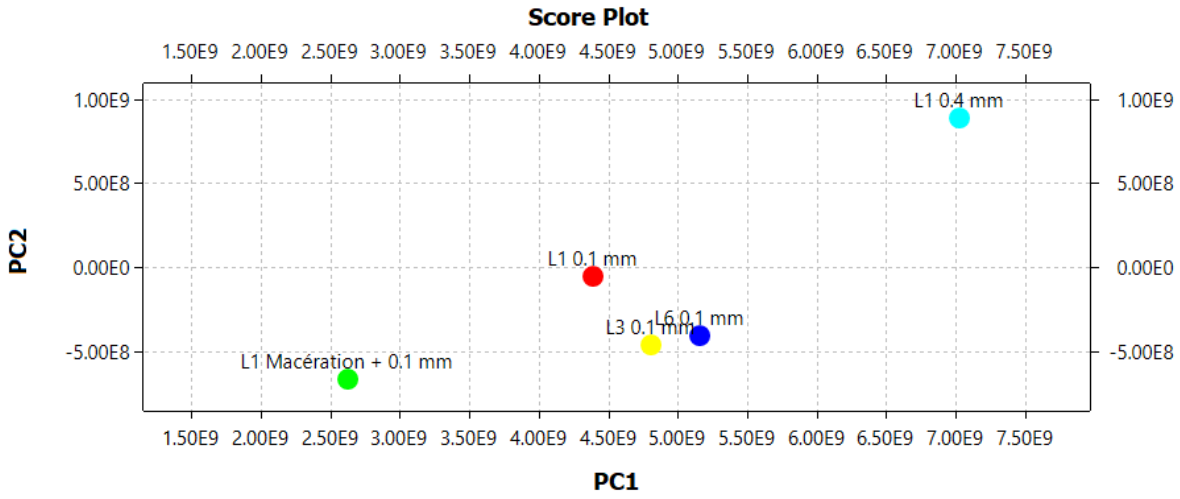


Fig. 1 : Analyse en composante principale de la granulométrie des pyrolysat et des minéraux sur les produits de dégradation du hêtre. Est représenté le résultat d'une PCA sur différents échantillons de l'écorce d'un seul hêtre. PC1 explique 85% de la variance et PC2 en explique 13%. Les échantillons sont décrits selon 3 critères : la hauteur de l'arbre, la granulométrie et la macération. L indique différentes hauteurs (L1 = 0,3 m ; L3 = 1,3m ; L6 = 14,85m)

Les effets de macération et de granulométrie ont plus d'impact sur les produits formés par pyrolyse que l'effet hauteur. Les composés à l'origine de ce résultat sont surtout des produits de pyrolyse des carbohydrates tel que l'acide acétique, l'hydroxyacétaldehyde etc.

Comparaison de Py-lignine et de lignine de Klason

Sur la Fig. 2, la proportion de lignine déterminée par la méthode classique de Klason se situe entre 30 et 26%, ce qui est concordant avec la littérature. La Py-lignine mesurée par méthode indirecte est légèrement sur-estimée dans les 2 cas mais suit la même tendance que la lignine de Klason. L'erreur relative est plus basse que 1% pour tous les échantillons.

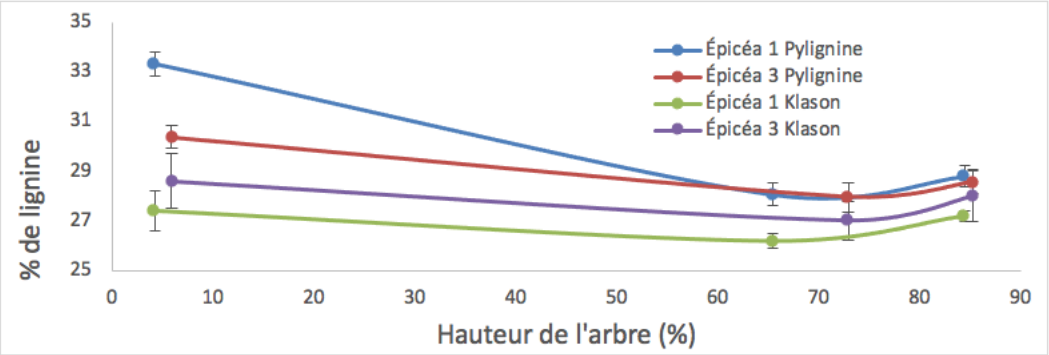


Fig. 2 : Comparaison de Py-lignine et de lignine de Klason sur le duramen d'épicéa

Discussion

Les résultats de la PCA montrent que les facteurs de granulométrie et de composition minérale affectent les résultats très fortement car ceux-ci engendrent une plus grande différence entre les échantillons que des propriétés structurelles tel que la hauteur. Ceci illustre le besoin de contrôler et de maîtriser tous les facteurs expérimentaux pouvant modifier les résultats.

La Py-lignine suit la même tendance que la lignine de Klason, ce qui est l'information principale à tirer de cette expérience. Le % de lignine, *via* Py-lignine a été déterminée en utilisant uniquement les monomères volatils. Avec ces données expérimentales nous observons une concordance avec les données obtenues par la technique traditionnelle KLASON. Cependant, nous n'avons utilisé ici que les monomères volatiles et pas les oligomères probablement majoritaires lors de la dégradation de la biomasse (Mohan et al. 2006), nous permettons ainsi d'imaginer réaliser des corrections afin de rapprocher d'avantage les résultats des deux méthodes. De plus, l'erreur obtenue lors du calcul de la Py-lignine est du même niveau, voire plus faible que l'erreur usuelle de la lignine de Klason, ce qui est un atout de la méthode.

Conclusion

L'étude étant encore dans un stade assez jeune, pas toutes les essences à disposition n'ont encore été analysées mais sur le duramen d'épicéa les résultats donnent confiance pour un fonctionnement avec les autres essences et compartiments.

Bibliographie

Mohan D., Pittman C.U., Steele P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy and Fuels, 20(3), 848–889. https://doi.org/10.1021/ef0502397

Patwardhan P.R. (2010) Understanding the product distribution from biomass fast pyrolysis. Graduate Theses and Dissertations. 11767. https://lib.dr.iastate.edu/etd/11767

Patwardhan, P.R., Satrio J.A., Brown, R.C., Shanks B.H. (2010) Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. Bioresource Technology, 101(12), 4646–4655. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.112

Shen J., Wang X.S., Garcia-Perez M., Mourant D., Rhodes M.J., Li, C.Z. (2009) Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. Fuel, 88(10), 1810–1817. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.001

Comportement effectif de la paroi cellulaire du bois : comparaison numérique et analytique

PHAN Nhat Tung[1], AUSLENDER François[1], GRIL Joseph[1], MOUTOU PITTI Rostand[1,2]

[1]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal,
F-63000 Clermont Ferrand, France
[2]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
nhat_tung.phan@etu.uca.fr

Mots clefs : Comportement élastique effectif ; Paroi cellulaire ; Méthode d'homogénéisation ; Eléments finis.

Contexte et objectif

L'objectif de cette étude est d'analyser numériquement et analytiquement les propriétés élastiques linéaires de la paroi cellulaire du bois à travers des modèles de changement d'échelle. A cette intention, une approche numérique ainsi qu'une approche analytique simplifiée du comportement de la paroi cellulaire à l'échelle subpariétale sont proposées. Ces deux approches sont basées sur la description de la structure subpariétale et la disposition géométrique des macrofibrilles dans la paroi S_2.

Pour ce qui concerne l'approche numérique, celle-ci consiste à homogénéiser par des simulations par éléments finis une cellule périodique unitaire décrivant la morphologie de la paroi cellulaire S_2 et soumise à des conditions aux limites périodiques. L'apport de ce travail consiste à décrire de manière plus détaillée la morphologie réelle de la paroi cellulaire en prenant en compte des macrofibrilles incurvées et reliées entre elles plutôt que de les considérer parallèles comme cela est supposé habituellement (Ahmad 2013).

Pour ce qui concerne l'approche analytique, le modèle proposé par Gril (1988) permet également de prendre en compte le fait que les macrofibrilles sont incurvées et connectées entre elles et non parallèles, et pourra servir pour comparaison.

Description de la cellule élémentaire

La paroi cellulaire est constituée de couches concentriques, chacune composée de microfibrilles de cellulose entourée par une matrice amorphe composée d'un mélange d'hémicellulose et de lignine.

Pour la paroi S_2, les microfibrilles sont enroulées de manière hélicoïdale autour de l'axe longitudinal des trachéides. Les microfibrilles sont modélisées dans cette étude par des cylindres de section rectangulaire d'environ 3-4 nm de largeur (Fig. 1a). Les microfibrilles sont distribuées parallèlement au sein d'une matrice de glucomannane et regroupées en entités plus grandes appelées macrofibrilles, dont la section transversale est en moyenne entre 16 et 20 nm (Salmén 2004). Ce sont les macrofibrilles qui sont considérées comme incurvées et reliées entre elles selon la géométrie illustrée par la Fig. 1a. La cellule unitaire est constituée de deux macrofibrilles, quasi cylindriques de section rectangulaire, reliées dans le plan **xy** et entourées de matrice selon la géométrie décrite par la Fig. 1b. Dans la direction **z**, on suppose en plus la présence d'une couche de matrice d'épaisseur constante séparant ainsi dans cette direction les macrofibrilles d'une couche périodique à une autre.

On suppose par ailleurs que les macrofibrilles ont un comportement élastique isotrope transverse et que la matrice est élastique linéaire isotrope.

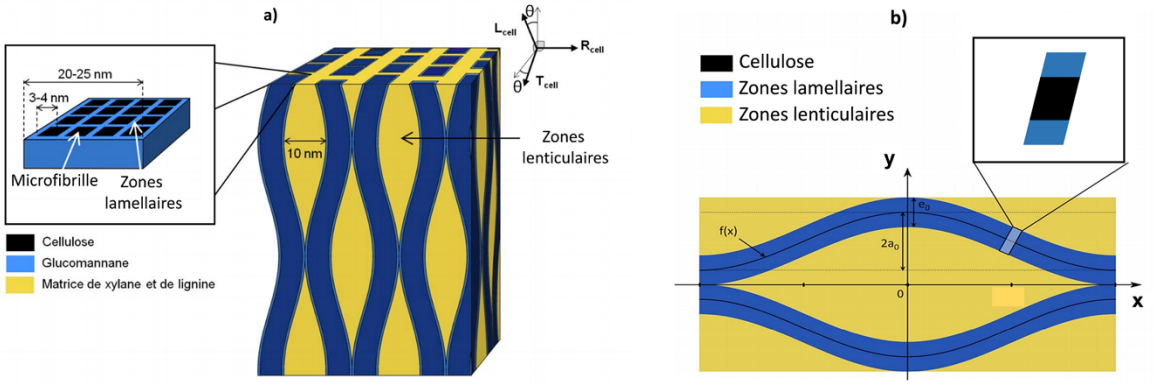
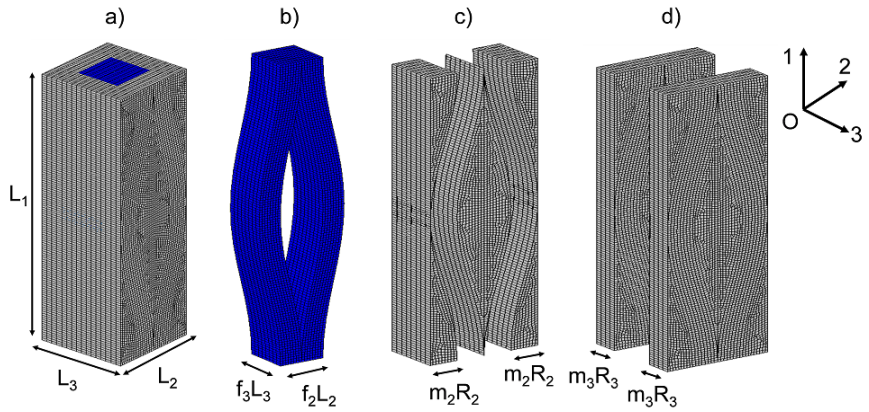


Fig. 1 : Structure schématique des macrofibrilles connectées et incurvées (Bonnet 2017).

Approche numérique

Analyse de l'effet des minéraux et de la granulométrie

Pour mailler la cellule élémentaire, nous avons procédé de la façon suivante. Les deux macrofibrilles cylindriques de section carrée sont générées à partir d'une courbe sinusoïdale. La matrice est constituée de deux zones différentes : une zone lenticulaire entourant les macrofibrilles dans les directions **1** et **2** (correspondant aux direction x et y de la Fig. 1) et une zone lamellaire entourant l'ensemble macrofibrilles / zone de matrice lenticulaire dans la direction **3,** comme cela est décrit par la Fig. 2.



Il est à noter que :

$f_i + m_i = 1$

f_i : Proportion linéique de la fibre.

m_i : Proportion linéique de la matrice de lignine et d'hémicellulose.

Fig. 2 : Maillage d'une cellule élémentaire à deux fibres ondulées : (a) Modèle de la cellule élémentaire avec deux fibres ondulées ; (b) Maillage de deux fibres ondulées ; (c) Maillage des zones lenticulaires de la matrice ; (d) Maillage des zones lamellaires de la matrice.

Calcul du comportement effectif

Pour calculer le comportement effectif de la cellule élémentaire périodique, nous utilisons une approche en déformation et appliquons ainsi des conditions aux limites (CL) périodiques (Bornert et al. 2001) du type :

$$u_i(\underline{x}) = E^0_{ij}.x_j + u'_i(\underline{x}) \qquad (1)$$

où E^0_{ij} est le tenseur homogène des déformations macroscopique et $u'_i(\underline{x})$ représente un champ de déplacement périodique.

En appliquant 6 chargements élémentaires différents et en résolvant le problème local d'élasticité associé à la cellule élémentaire soumise à ces CL, on calcule la contrainte macroscopique $\overline{\sigma}_{ij}$ à l'aide de la relation :

$$\overline{\sigma}_{ij} = \langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} \, dV \qquad (2)$$

Les propriétés élastiques effectives $\tilde{C}_{ijkl}$ de la paroi cellulaire sont alors déterminées par la relation suivante.

$$\overline{\sigma}_{ij} = \tilde{C}_{ijkl} . \overline{\varepsilon}_{kl} \qquad (3)$$

Du fait de l'isotropie transverse du comportement des fibres, de l'isotropie du comportement de la matrice, ainsi que de l'existence de deux plans de symétrie pour la cellule élémentaire, on notera que le comportement effectif est nécessairement orthotrope.

Approche analytique

Une approche analytique en contraintes planes basée sur la description géométrique de la cellule unitaire définie précédemment a été proposée par J. Gril (1988). Cette approche permet la détermination de la rigidité du réseau de macrofibrilles en l'absence de matrice (Fig. 3).

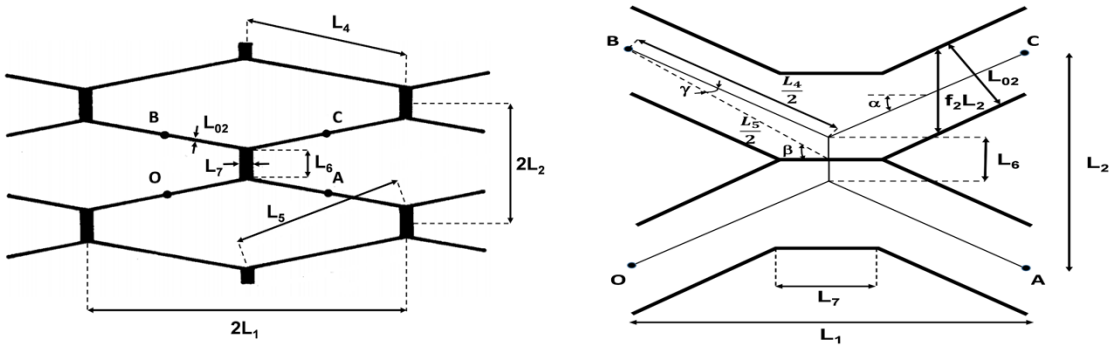


Fig. 3 : Schématisation d'une lamelle du réseau microfibrillaire à l'aide d'un assemblage périodique de poutres et de poutrelles

Résultats et discussions

Les résultats obtenus analytiquement par l'approche de Gril (1988) sont confrontés à ceux issus de l'approche numérique dans le cas d'une matrice infiniment souple (Fig. 4). On notera que l'approche numérique fournit la solution de référence du problème, c'est-à-dire la solution « exacte » aux approximations numériques près. Cette confrontation est faite sur la base des coefficients de la matrice de rigidité ($\tilde{C}_{ij}$) obtenus en faisant varier la fraction volumique de la fibre. La comparaison des deux approches (numérique et analytique) permet de constater que l'approche analytique de Gril représente de manière satisfaisante le comportement effectif du réseau de macrofibrilles évalué par les simulations éléments finis.

Conclusions et perspectives

Dans cette étude une comparaison entre le comportement effectif numérique et analytique du réseau de macrofibrilles en l'absence de matrice a été réalisée. Cette comparaison a permis de montrer que le modèle analytique décrit convenablement le comportement effectif du réseau de macrofibrilles évalué par homogénéisation numérique.

Dans le but de prendre en compte l'ondulation des macrofibrilles dans les trois directions spatiales, une nouvelle description morphologique 3D de la cellule élémentaire est en cours d'élaboration. Ce nouveau modèle de microstructure, permettra l'analyse du comportement effectif de la paroi cellulaire en tenant compte du mouvement des microfibrilles non seulement dans le plan 12, mais aussi dans le plan 13.

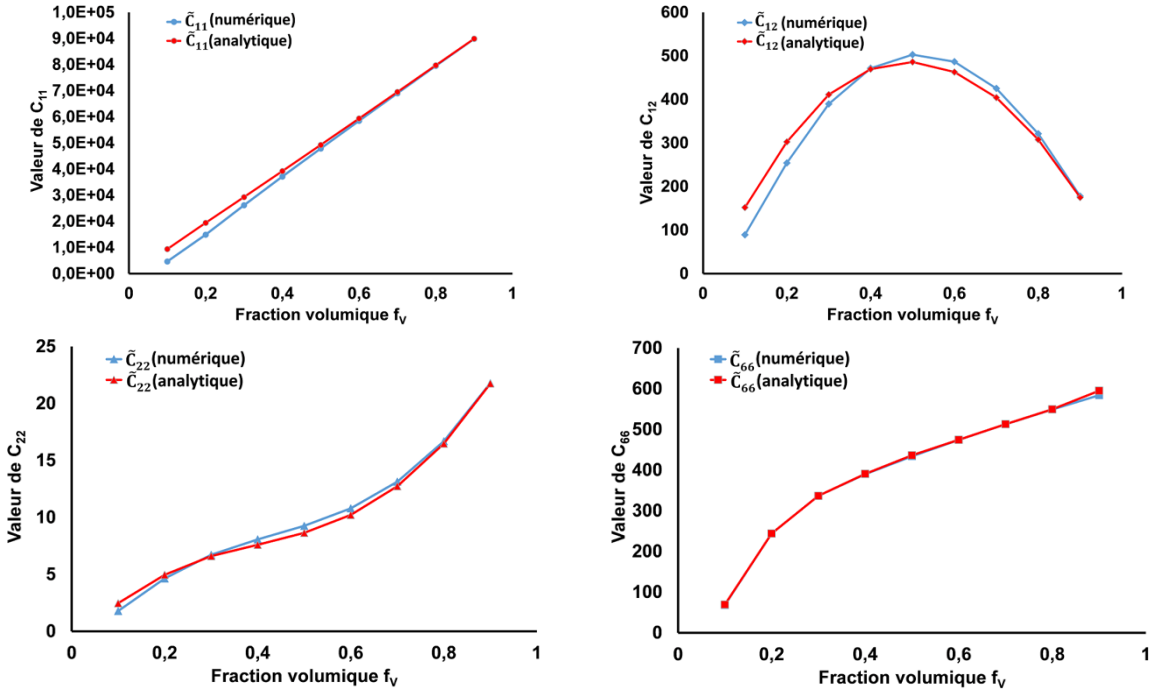


Fig. 4 : Comparaisons des valeurs de $\tilde{C}_{ij}$ entre les deux modèles utilisés.

Références

Ahmad R.A. (2013) Multiscale Poroelastic Model - Bridging the Gap from Cellular to Macroscopic Scale. Doctor of Sciences, ETH Zurich, page 8-10.

Bornert M., Bretheau T., Gilormini P. (2001) Homogénéisation en mécanique des matériaux 1 : matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques. Vol. Tome 1. Composites à microstructure périodique, chapitre 3.

Gril J. (1988) Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Thèse de doctorat, Université Paris 6, partie 3.

Salmén L. (2004) Micromechanical understanding of the cell-wall structure. Comptes Rendus Biologies Volume 327, Issues 9–10 (octobre), Pages 873-880.

Bonnet M. (2017) Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne. Thèse de doctorat, Spécialité Structures et Matériaux, Université Paris-Est, page 125-129.

Nouvelles avancées dans la caractérisation de la structure du liège

CHANUT Julie[1,2], CROUVISIER-URION Kevin[1,2], LAGORCE Aurélie[1,2], WINCKLER Pascale[1,4], FERRET Eric[1], GOUGEON Régis D.[1,3], BELLAT Jean-Pierre[2], KARBOWIAK Thomas[1]
[1]Univ. Bourgogne Franche-Comté, Agrosup Dijon, UMR PAM A 02.102, 1 Esplanade Erasme, 21000, Dijon, France
[2]Univ. Bourgogne Franche-Comté, ICB-UMR 6303 CNRS, 9 avenue Alain Savary, B.P. 47870, 21078, Dijon, France
[3]Univ. Bourgogne Franche-Comté, Inst Univ Vigne & Vin, 1 Rue Claude Ladrey, 21078, Dijon, France
[4]Dimacell imaging facility, Agrosup Dijon, INRA, INSERM, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000, Dijon, France
julie.chanut@agrosupdijon.fr

Mots clefs : Liège ; Structure cellulaire ; Tomographie ; Porosité ; Lenticelles ; Différenciation cellulaire.

Contexte & Objectifs

En 1665, Robert Hooke a été le premier à observer les cellules du liège et leur forme hexagonale caractéristique, en utilisant l'un des tous premiers microscopes optiques (Hooke 1665). Le liège est décrit comme un matériau alvéolaire composé de cellules fermées, vides et mortes. Au cours du temps, l'utilisation de techniques d'imagerie plus sophistiquées a permis d'étudier plus finement la structure du liège (Lagorce-Tachon et al. 2015, Lagorce-Tachon et al. 2018), et en particulier les différences entre les cellules du phellème et celles des lenticelles. L'objectif de cette étude est d'aborder cet aspect au moyen de techniques d'imagerie à plusieurs échelles. Tout d'abord, à l'échelle macroscopique, la tomographie aux rayons X a été utilisée pour caractériser la structure et la porosité de bouchons de liège naturel. Les différences structurelles entre les cellules composant le phellème et celles qui bordent les lenticelles ont ensuite été mises en évidence grâce à l'utilisation de la microscopie biphotonique. Enfin, à l'échelle nanométrique, des observations par microscopie électronique à transmission ont été réalisées pour observer la structure des plasmodesmes qui traversent les parois cellulaires.

Matériel & Méthode

Bouchons de liège. Les bouchons de liège naturel ont été fournis par Bouchons Trescases S.A. (France). Toutes les expériences ont été réalisées sur des bouchons de liège dits haut de gamme (24 mm x 49 mm) n'ayant subi ni lavage ni traitement de surface. Des bouchons de liège dits d'entrée de gamme (24 mm x 49 mm) ont également été utilisés pour la tomographie aux rayons X.

Tomographie aux rayons X. Les échantillons de liège ont été analysés sur un micro-CT Phoenix Nanotom (General Electric). Les images ont été acquises avec un temps d'exposition de 500 ms (45 kV ; 445 µA) sur une rotation de 360° avec une résolution de 12 µm / pixel. La reconstruction 3D a été réalisée sur Octopus Reconstruction 8.9.2 (XRE) puis l'analyse sur Avizo (Thermo Fischer Scientific). Comme le liège est composé d'atomes ayant un facteur d'absorption des rayons X similaire, la partie plus dense de la matière à l'intérieur du matériau absorbe une grande quantité de rayons X et apparaît en blanc sur la reconstruction. En revanche, les pores apparaissent en noir. Deux seuillages ont alors été appliqués pour isoler les lenticelles et la matière densifiée.

Le nombre de voxels correspondant à ces deux seuils distincts a ensuite été déterminé pour calculer le volume occupé par les pores et par la matière densifiée. Il a également été possible de représenter les voxels associés à chaque seuillage dans le bouchon de liège plein et d'observer leur interconnexion. Un bouchon de chaque qualité a été analysé.

Spectroscopie photoélectronique X. De la poudre de liège issue des cellules du phellème et des lenticelles a été prélevée en surface avec un scalpel. Cette poudre a été tamisée pour obtenir une granulométrie <50 µm afin de déterminer sa composition chimique par analyse XPS sur un appareil PHI Versaprobe 5000. Un rayonnement de 50 W Al Kα (1486,7 eV) a été utilisé comme source de rayons X. Les mesures ont été effectuées à température ambiante dans un compartiment à ultravide sur un spot d'un diamètre de ~200 µm. Des balayages intégrés à haute résolution ont été acquis (58 eV, 45°). Les spectres XPS ont été normalisés en fonction des liaisons C-C/C-H (carbone 1s à 284,6 eV). Le pourcentage de carbone, d'oxygène et d'azote a été quantifié sur 4 échantillons.

Microscopie électronique à transmission. Les échantillons de liège ont été congelés sous haute pression (congélateur Leica HPM 100). Ils ont ensuite subi des congélations successives de -90°C à -30°C (à 3 °C.h^{-1}), puis rincés avec de l'acétone à -30 °C, et progressivement imbibés avec des mélanges d'acétone/résine époxy Epon jusqu'à 20 °C. La polymérisation a été effectuée à 60 °C. Les blocs d'échantillons de liège enrobés d'Epon ont été découpés en fines sections, et placés sur des grilles de cuivre recouvertes de carbone/collodion. Les grilles ont été colorées avec de l'UranyLess pendant 8 min et avec du citrate de plomb pendant 2 min. Les sections ont été observées sur un microscope électronique à transmission Hitachi H7500 fonctionnant à 80 kV et équipé d'une caméra AMT. 5 échantillons ont été congelés, et 3 observations ont été effectuées sur ces échantillons à plusieurs niveaux.

Microscopie biphotonique. La microscopie biphotonique a été réalisée pour obtenir des représentations 3D de la structure cellulaire du liège. Les images ont été obtenues avec un microscope à balayage Nikon A1-MP équipé d'un objectif Plan APO IR 60x (NA, 1,27 ; Water Immersion, Nikon). Un laser IR (Caméléon, Coherent) a été utilisé pour fournir une excitation à 800 nm. L'émission d'auto-fluorescence du liège a été capturée sur quatre canaux de détection : FF01-492/SP (400-492 nm), FF03525/50 (500-550 nm), FF01-575/25 (563-588 nm) et FF01-629/56 (601-657 nm) (Semrock). Avant l'observation, le liège a été immergé dans de l'eau distillée à 25 °C pendant 1 mois. La représentation 3D a été obtenue par superposition d'images scannées le long de la profondeur des échantillons (140 µm) avec un pas d'acquisition de 0,5 µm. Les observations ont été effectuées le long du plan perpendiculaire aux directions radiale et axiale du liège.

Résultats et Discussion

Echelle macroscopique.

La quantité de lenticelles représente le principal critère définissant la qualité du liège (Pereira 2007). Pour évaluer la porosité interne correspondant aux lenticelles, des observations par tomographie aux rayons X ont été réalisées sur des bouchons de liège de deux qualités différentes (entrée de gamme et haut de gamme) (Fig. 1a). Dans un premier temps, le volume poreux des lenticelles a été déterminé en utilisant un seuillage sur les pixels noirs sur chaque tranche du bouchon. Une représentation 3D du réseau macroporeux des lenticelles a ensuite été reconstruite pour les bouchons d'entrée de gamme et haut de gamme.

Dans les deux cas, les lenticelles ne sont pas interconnectées (Fig. 1b et 1c). Une différence significative de volume poreux est aussi notable avec un volume autour de 2% (v/v) pour des bouchons de qualité supérieure et de 6% (v/v) pour les bouchons d'entrée de gamme.

Echelle microscopique.

Le liège possède une auto-fluorescence naturelle qui permet de facilement observer les parois cellulaires par microscopie biphotonique. La lignine et la subérine, sont deux fluorophores naturels, qui présentent une gamme d'émission de 440 à 540 nm et de 460 à 500 nm. Les observations réalisées ont permis de mettre en évidence que les cellules à la limite phellème/lenticelle possèdent une paroi plus épaisse avec une épaisseur caractéristique d'environ 10 µm, contre 1 µm pour la paroi des cellules du phellème (Fig. 2). De plus, cette différenciation cellulaire est limitée à une seule couche cellulaire. En outre, l'émission de fluorescence est différente entre ces parois cellulaires densifiées bordant les lenticelles et celles du phellème. L'imagerie a été couplée à une analyse de la composition chimique de la paroi cellulaire par XPS a révélé une différence significative entre le phellème et les lenticelles. Les parois cellulaires bordant les lenticelles présentent une teneur en carbone plus élevée (rapport C/O de 4,28 ± 0,16) par rapport à celles du phellème (rapport C/O de 3,79 ± 0,09) indiquant un changement de composition chimique dû à la différenciation des cellules.

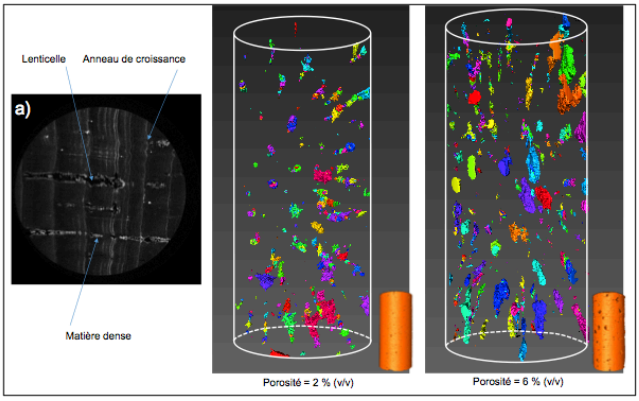


Fig. 1 : (a) Observation par tomographie aux rayons X d'une coupe transversale d'un bouchon de liège, et volume poreux des lenticelles de bouchons de liège (b) haut de gamme et (c) entrée de gamme.

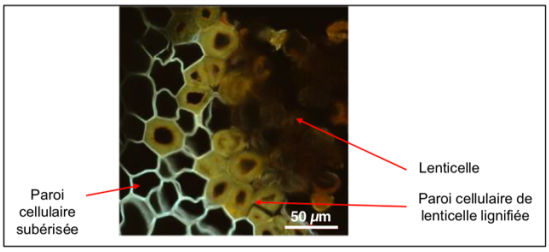


Fig. 2 : Représentation 2D du phellème incluant une lenticelle et mettant en évidence une densification de la paroi des cellules bordant les lenticelles

Échelle nanométrique.

Les premières observations par MET de la paroi cellulaire du phellème permettent de constater que les plasmodesmes traversent les quatre couches qui constituent la paroi cellulaire du phellème : la lamelle centrale (ML), la paroi primaire (PW), la paroi secondaire (SW) et la paroi tertiaire (TW) (Fig.3). De plus, la structure et la composition chimique de ces couches constitutives semblent différentes, compte tenu des contrastes obtenus. En ce qui concerne la forme et la structure des plasmodesmes, ils sont pour la plupart non ramifiés, avec un diamètre d'environ 50 ± 10 nm, et non répartis uniformément le long de la paroi de la cellule. De plus, ils apparaissent obstrués à leurs extrémités par la paroi tertiaire. Dans certains cas, en plus de la paroi tertiaire, un dépôt de résidus cytoplasmiques denses a été observé qui apparait plus épais à l'extrémité des plasmodesmes et des desmotubules. Un tel dépôt de matière aux extrémités des plasmodesmes est un mécanisme bien connu pour les cellules végétales après un facteur de stress, car il régule la diffusion des métabolites entre les cellules vivantes ou est lié à la mort cellulaire programmée. Dans ce cas, la perte du cytoplasme entraîne la subérisation rapide du phellème suivie de l'obstruction des plasmodesmes dans le cas du liège.

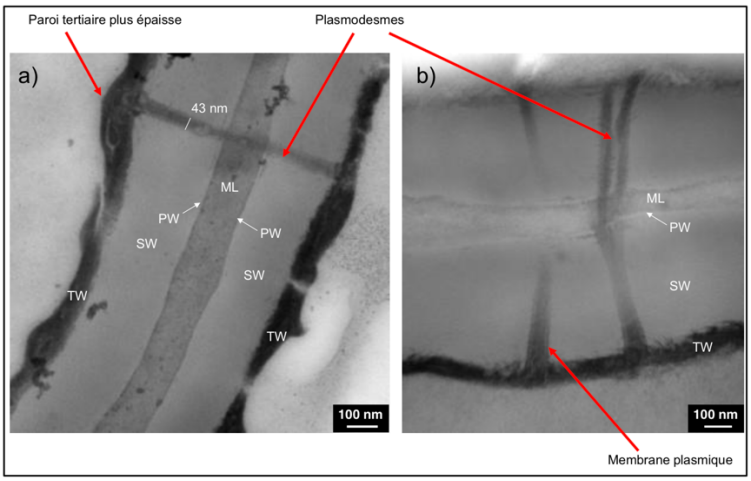


Fig. 3 : Parois des cellules du phellème observées par MET avec la mise en évidence d'un ou de plusieurs plasmodesmes traversant la paroi. (a) Une région plus épaisse peut être observée aux extrémités des plasmodesmes. (b) Observation de la membrane plasmique

Conclusion et perspectives

La tomographie aux rayons X a tout d'abord permis l'analyse de la macroporosité des bouchons de liège et la détermination de la fraction volumique des lenticelles dans le matériau. La microscopie biphotonique a ensuite révélé des différences de structure et de composition chimique entre les cellules du phellème et celles des lenticelles, ce qui a été confirmé par analyse XPS. Les parois cellulaires plus épaisses à la limite des lenticelles sont principalement composées de lignine, qui provient de la différenciation lenticulaire du phellogène, tandis que les parois cellulaires du phellème sont principalement composées de subérine. Enfin, à l'échelle nanométrique, les caractéristiques structurelles des plasmodesmes qui traversent les parois cellulaires ont été étudiées par MET. Les plasmodesmes ont subi un phénomène de subérisation et semblent être obstrués après la mort cellulaire programmée lors du développement de l'écorce du liège. Cette approche d'imagerie multi-échelle apporte de nouvelles perspectives dans la caractérisation de la structure du liège. Cela permettra le développement ultérieur de modèles structurels plus précis afin d'établir des relations avec les propriétés fonctionnelles du matériau.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le conseil régional de Bourgogne-Franche-Comté et le fonds européen de développement régional (FEDER). Les auteurs souhaitent remercier Zi Wang, Pieter Verboven et Bart Nicolai de l'Université KU Leuven pour leur aide en tomographie aux rayons X, Olivier Heinz de l'ICB (Dijon) pour son aide en spectroscopie photoélectronique X ainsi que Jeannine Lherminier de l'INRA Dijon pour son aide en MET.

Références

Hooke R. (1665) Micrographia or some physiological descriptions of minutes bodies made by magnifying glasses. Londres, J. Martyn and J. Allestry.

Lagorce-Tachon A., et al. (2015) The cork viewed from the inside. Journal of Food Engineering 149: 214-221.

Lagorce-Tachon A., et al. (2018) Contribution of image processing for analyzing the cellular structure of cork. Journal of Chemometrics 32(1): e2988.

Pereira H. (2007) Cork: Biology, production and uses. Amsterdam, Elsevier.

Compréhension des mécanismes de la xylogénèse et de la physiologie des arbres de peuplier, de noyer et de robinier agroforestiers pour une valorisation dans la filière bois

HEIM Lucie[1], CANDELIER Kevin[2,3], BADEL Eric[4], DENAUD Louis[1], MARCHAL Rémy[1]

[1]Arts et Métiers, LABOMAP, HESAM Université, F-71250 Cluny, France
[2]CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier
[3]BioWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, F-34000 Montpellier
[4]Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000 Clermont-Ferrand
lucie.heim@ensam.eu

Mots clefs : Agroforesterie ; croissance ; qualité du bois ; *Juglans Regia x Nigra* ; *Robinia pseudoacacia* ; *Poplar sp. ;*

Introduction

Dans le contexte actuel de changements climatiques, l'agriculture tend à se réinventer afin d'allier transition agroécologique et augmentation de la production de biomasse à l'hectare. S'opposant au modèle agricole actuel, qui combine intensification des pratiques agricoles et surconsommation d'intrants, de nombreux modèles ont été développés parmi lesquels se trouve l'agroécologie, qui intègre les processus écologiques et la préservation des ressources naturelles dans le fonctionnement des systèmes de production. L'agroécologie regroupe de nombreuses pratiques dont l'agroforesterie, qui associe sur une même surface de production une composante arborée à une composante agricole et/ou d'élevage. Dans le but d'améliorer ce modèle agroécologique et sa résilience économique, il est donc nécessaire de considérer l'arbre comme une source de matière première, d'énergie et de molécules intégrable dans les approvisionnements de la filière bois (Labant 2017).

Les conditions de croissance des arbres dans les systèmes agroforestiers sont assez différentes de celles en milieu forestier : exposition accrue aux vents, accès plus important à la lumière, interactions fortes avec des cultures annuelles, nombreuses interventions humaines au niveau des branches et du système racinaire, vulnérabilité accrue à la sécheresse, etc. Ces conditions de croissances particulières impactent le développement architectural et la xylogénèse des arbres agroforestiers.

Cet article présente les premiers résultats obtenus dans le cadre d'une thèse débutée en janvier 2020 et qui tend à explorer la dynamique de croissance des arbres agroforestiers et la qualité de leur bois. La qualité des bois sera abordée sur deux aspects : les performances mécaniques et aptitude à la transformation au déroulage (marché de la construction) ; la composition biochimique (duraminisation, durabilité, coloration des bois à l'étuvage, potentiel de valorisation des molécules…).

La croissance et la qualité du bois agroforestier de trois essences seront comparées à celles de bois des trois mêmes essences ayant poussés dans des conditions plus conventionnelles en termes de densité de peuplement. Les trois essences que nous étudierons sont le noyer, le robinier et le peuplier.

Matériel et méthode

Les études sont conduites sur trois sites expérimentaux : deux gérés par l'INRAE (Noyer, robinier) et un par un agriculteur (peupliers)

Noyers agroforestiers

Situé à Prades-le-Lez, à proximité de Montpellier, le domaine départemental de Restinclières a été créé en 1990 et s'étend sur 250 hectares. En 1995, l'UMR System (INRAE) a mis en place un dispositif expérimental qui comprend 50 ha de parcelles agroforestières. Quatre parcelles de noyer hybrides y sont notamment étudiées. Les noyers hybrides agroforestiers sont cultivés pour la production de bois et sont associés à des cultures de céréales gérées par un agriculteur.

Deux parcelles permettent un comparatif agroforesterie/plantation conventionnelle toutes choses égales par ailleurs : la première (parcelle A3, Fig. 1) est une parcelle agroforestière orientée Nord/Sud. La densité de noyers hybrides sur cette parcelle est de 100 arbres/ha. La distance initiale entre deux arbres d'une même ligne était de 4 m lors de leur plantation. De nombreuses éclaircies ont été réalisées et les noyers sont désormais espacés de 4, 8, 12 ou 16 m. Les noyers sont associés à des cultures intercalaires. La seconde parcelle (parcelle A4, Fig. 2) est une parcelle forestière témoin jouxtant au nord la première également orientée Nord/Sud.

Fig. 1 – Parcelle de noyers agroforestiers, mai 2020

Fig. 2 – Parcelle de noyers forestiers, mai 2020

L'UMR System assure un suivi de la croissance des noyers avec une mesure annuelle de la circonférence à 1,30 m depuis 2002 et une mesure annuelle de la hauteur totale depuis 1995. Ce suivi permet ainsi de comparer la croissance en hauteur et la croissance radiale des noyers agroforestiers (AF) à celle du système forestier (FC).

Seize noyers ont été abattus en mars 2020 (8 agroforestiers et 8 forestiers). De nombreuses analyses comparatives sont actuellement en cours sur ces arbres (Fig. 3). D'autres études seront menées en parallèle, telle que la comparaison de la qualité du bois des branches, des nœuds et du tronc de noyers.

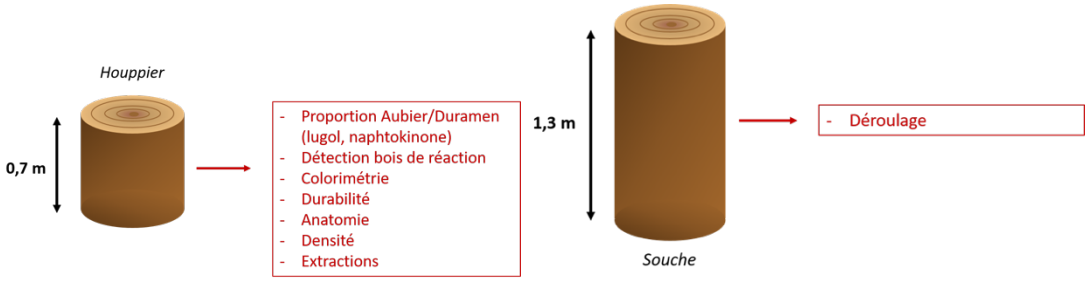


Fig. 3 – Echantillonage et analyses en cours sur les noyers AF et F

Robiniers agroforestiers

Ce dispositif expérimental situé à Mauguio (au Sud de Montpellier) et qui s'étend sur 5 ha a été créé en 2017 par l'UMR Eco&Sol (INRAE) afin d'étudier plusieurs problématiques, dont les performances sur le long terme des agroécosystèmes et leur résilience face au changement climatique (sècheresse).

C'est un dispositif factoriel composé de 3 blocs expérimentaux chacun divisé en deux parcelles : une agroforestière et l'autre forestière, servant de témoin. On retrouve au sein des parcelles agroforestière une association culture intercalaire céréalière (blé)/essence forestière (robinier). L'interligne est de 17 m, les arbres étant espacés de 2 m entre eux au sein d'une même ligne. 90 robiniers ont été tuteurés afin de limiter les sollicitations mécaniques induites par le vent, tandis que 90 autres servant de témoins ont été laissés libres au vent.

Afin d'étudier l'impact du vent sur les croissances primaires et secondaires, des mesures de la hauteur et du diamètre de ces robiniers seront réalisées annuellement au cours de la thèse. La première campagne de mesures a été réalisé au mois de mai 2020.

Peupliers agroforestiers

Ce dispositif agroforestier, situé à Lent dans l'Ain, a été créé par un agriculteur indépendant. Situé sur une ancienne parcelle agricole, il est composé de deux parcelles accolées, l'une agroforestière et l'autre forestière.

La parcelle forestière s'étend sur 2 ha. Plantée entre 2003 et 2004, elle est composée de deux cultivars, le Koster et l'I214. L'interligne qui mesure 7 m de largeur est fauchée une fois par an. La parcelle agroforestière occupe la même surface que la parcelle forestière (2 ha), mais elle est cependant plus récente, puisque les peupliers ont été planté entre 2009 et 2013. Elle est composée de multiples cultivars tels que le I214, le Koster, mais aussi le Tricho, l'Albelo, et le Polargo. Sur cette parcelle, les lignes d'arbres sont espacées de 20 m. Les arbres au sein d'une même ligne sont espacés de 5 m. L'interligne est également fauchée une fois par an.

Les essais réalisés au cours de la thèse sur ces parcelles porteront notamment sur la déroulabilité et la mécanique de l'arbre (présence de bois de tension, proportion bois juvénile/bois adulte).

Fig. 4 - Parcelle agroforestière de peupliers

Fig. 5 - Parcelle forestière de peupliers

Résultats et Discussion

Les premiers résultats obtenus lors de cette thèse concernent l'étude des croissances primaires et secondaires de noyers du dispositif agroforestier de Restinclières.

Le suivi annuel de la croissance du noyer a montré que la croissance radiale dans la parcelle agroforestière (AF, 140 noyers) est en moyenne 50 % plus importante que celle de la parcelle forestière (F, 235 noyers), avec des valeurs moyennes de circonférence de 95 cm et 66 cm, respectivement (Fig. 6). La hauteur des noyers de la placette AF est également plus importante que celle des arbres de la placette FC, avec des valeurs moyennes de 12,8 m et 11,5 m de

hauteur, respectivement (Fig. 7) En ce qui concerne la croissance radiale, nos résultats sont en accord avec les observations faites sur l'impact de la densité des peuplements sur la croissance. Dans les peuplements forestiers, la densité a des effets significatifs sur la croissance radiale des arbres et sur la taille de la couronne. Une faible densité de peuplement conduit à la formation d'arbres dont le diamètre est plus important que celui d'arbres plantés à des densités supérieures (Jiang et al. 2007). De plus, Cabanettes et al (2004) ont montré que l'espacement des arbres dans les systèmes agroforestiers favorisait leur croissance radiale.

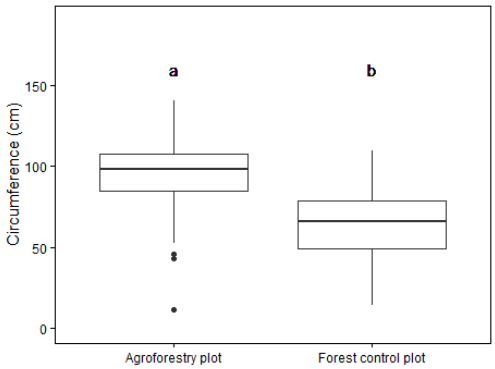


Fig. 6 *:* Circonférences à 1,30 m des noyers AF et F, 2017

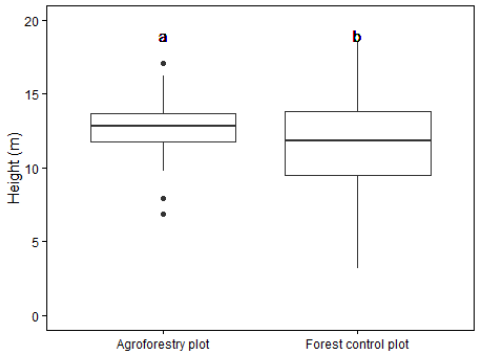


Fig. 7 : Hauteurs totales des noyers AF et F, 2017

Conclusion et perspectives

L'étude de la croissance des noyers agroforestiers de Restinclières semble indiquer que ces derniers ont un taux de croissance plus élevé en hauteur et en largeur que les noyers forestiers témoins. Ils ont par conséquent produit plus de biomasse que les noyers provenant d'une parcelle conventionnelle au même âge. Les noyers agroforestiers présentent ainsi un atout important pour le secteur industriel du bois mais aussi pour les agriculteurs en constituant une source importante de revenus supplémentaires au niveau de l'exploitation.

Après cette première approche quantitative, tous les autres essais en court visent à approcher le qualitatif de ces bois spécifiques et notamment la durabilité naturelle, l'aspect, la mécanique et l'aptitude au déroulage

Remerciements

Ce travail est financé par la Fondation de France dans le cadre de son appel à projets 2019 « Recherches sur les agroforesteries »

Références

Cabanettes, Alain, Auclair, D. Et Imam, W. (2004) Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. Agroforestry Systems. DOI 10.1023/A:1026440329824.

Jiang Z.H., Wang X.Q., Fei B.H., Ren H.Q., Liu X.E. (2007) Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with Populus xiaohei. Annals of Forest Science, 64(8) :807-814. DOI 10.1051/forest:2007063.

Labant P. (2017) Le dispositif spatial agroforestier à la croisée des champs : une approche pluridisciplinaire du développement de l'agroforesterie en France. These Univ. Toulouse 2.

Caractérisation de la cinétique de diffusion hydrique de bois sans défauts de feuillus

HSIEH Tai-Yun[1], MONTERO Cédric[1], BARDET Sandrine[1]

[1] Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC)
tai-yun.hsieh@umontpellier.fr

Keywords: sorption kinetics; wood-moisture relations; sorption models

Context and objectives

Wood is an important material of construction since ancient times and it becomes more valued in recent year due to its renewability and carbon storage. Different from other inorganic building materials, wood is a hygroscopic material which is highly sensitive to the humidity of the environment and temperature (Hailwood and Horrobin, 1946), expressed in the equilibrium moisture content (EMC) and hygroscopic deformations. Moreover, changing of moisture content affects the mechanical properties (Wilfred & Kollmann, 1968). For the use as timber material, changing of moisture content would lead to mechano-sorptive creep under continuous loading in addition to viscoelastic expression which would cause additional deflection and possibly induce structural pathologies. The moisture content plays an important role on mechanical property of wood. So that the equilibrium process of moisture content is needed to be well established.

The relationship between relative humidity and moisture content is not linear and depending on the holding ways of bonding water. The sorption isotherm is the graph of this relationship under a constant temperature (Schmulsky & Jones, 2011). The definition of EMC is that the moisture content of wood is no gain and lose and assuming that the rate of moisture content changing rate is low enough (Glass et al., 2018). It can be calculated at a first attempt by the equation of relative humidity and temperature (eq. 1) (Ross, 2010).

$$EMC(\%) = \frac{1800}{W}\left[\frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2}\right] \quad \text{(eq.1)}$$

In this equation, h is air relative humidity and W, K, K_1, K_2 are the parameters of temperature (T) in Celsius (°C) calculated by the below functions (Ross, 2010):

$$W = 349 + 1.29T + 0.0135T^2 \quad \text{(eq.2)}$$

$$K = 0.805 + 0.000736T - 0.00000273T^2 \quad \text{(eq.3)}$$

$$K_1 = 6.27 - 0.00938T - 0.000303T^2 \quad \text{(eq.4)}$$

$$K_2 = 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2 \quad \text{(eq.5)}$$

The relationship among moisture content, relative humidity and temperature has been studied for more than hundred years. However, it takes a period for wood to reach the EMC, the equilibrium of the moisture content is a kinetics behavior. The experiment on kinetics sorption has been carried out since the instrument improve these twenty years (Thybring et al., 2019). According to the result of Kohler (2006), the equilibrium process of mass by the time could be fitted by the Parallel Exponential Kinetics model (PEK-model). According to Morton and Hearle (1997) (as cite in Okubayashi et al., 2004), in PEK-model, the exchange of water vapor was separated into 2 mechanisms defined as fast and slow sorption sites, which can be related

to different types of amorphous regions, external or internal fiber surface, and direct or indirect sorption. The direct sorption happens at the external surfaces and amorphous regions could be defined as fast sorption. On the other hand, the sorption behavior on to the inner surface and crystallites, which could be relatively slow, could be defined as slow sorption (Okubayashi et al., 2004). In following functions, number 1 stands for the fast process and 2 stands for the slow process. The PEK-model of weight is defined as (eq.6):

$$W_t = W_{eq1}\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right) + W_{eq2}\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right) \quad \text{(eq.6)}$$

W_t is the mass at any time, W_{eq} is the mass at equilibrium at time τ. The correlation factor R^2 value of the fitting result is more than 0.999. Since PEK model was published, it was widely used to describe the sorption kinetics behavior of the natural fiber materials. It can fit not only the relationship between the mass and time, but also the equilibrium process of moisture content MC(t). MC_1 and MC_2 are the MC value assume that the samples were place in a constant h until equilibrium state associated with the 2-independent process (Himmel & Mai, 2016; Kachrimanis et al., 2006). τ_1 and τ_2 are characteristic time, which assume that the MC would be constant at time τ (eq.7) (Hill et al., 2010; Guo et al., 2018; Thybring et al., 2019):

$$MC(t) = MC_0 + MC_1\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right) + MC_2\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right) \quad \text{(eq.7)}$$

Although the PEK model is perfectly fitted to the experiment data of sorption in many references, it has been questioned about the physical meaning of the model. In addition, there is not a clear definition of equilibrium during the dynamic sorption process (Glass et al., 2018; Thybring et al., 2019). It still needs further study on the dynamic sorption behavior including the models and the physical explanation in order to characterize the variety of different wood sorption behaviour.

Materials and Methods

In this study, two different kinds of wood species have been tested: European beech *(Fagus sylvatica*) and European oak (*Quercus petraea*). The size of the specimens was 150 mm in length among longitudinal direction, 12 mm in width among radial direction, and 2 mm in thickness among tangential direction. To have the regulated controled environment, the test was performed inside an auto-climate chamber Memmert HPP110 (Fig.1). The experiment temperature was set at 20 °C. The relative humidity (h) was set at 30% for 3 days, and raise up to 80% for 7 days, and back to 30% for 200 hours (Fig.2). The environment condition data was collected by the sensor per minute. The balance METTLER TOLEDO ME204 was put inside the chamber and keep the shade open to make sure the environment condition inside and outside the balance were the same. One specimen was put on the balance and the weight value was collect per second continuously. The other specimens were place in the chamber at the same time, and the size of the specimens were measured at the 3rd-day (20 °C, h=30%), the 10th-day (20 °C, h=80%), and the end of the test (20 °C, RH=30%), for collecting the size value under different environment condition.

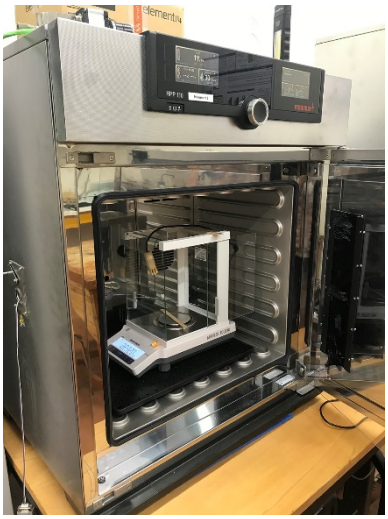


Fig. 1: Instruments setup.

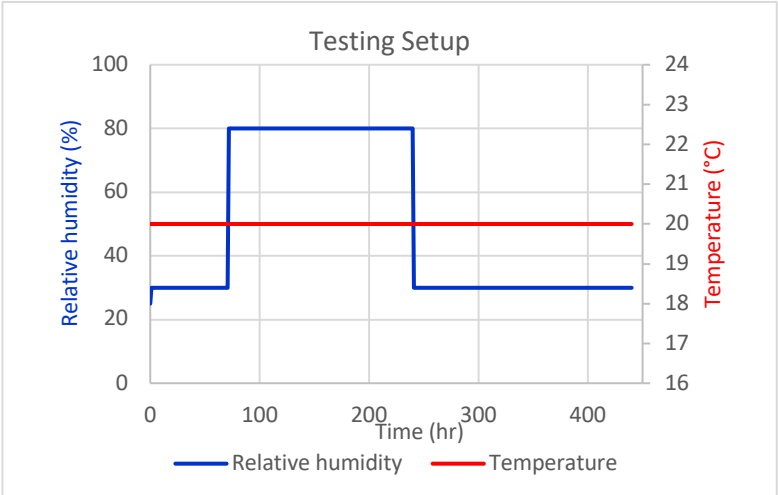


Fig. 2: Testing environment setup.

Results and Discussion

In this study, there are 6 different sorption curves would be concerned. The difference of the sorption curves among the specimens and wood species will be compared. Also, the testing result including both adsorption and desorption will be fitted by the PEK-model and the accuracy would be check. Through the PEK-model, the characteristic time τ would be defined as a reference time of MC of specimens reach the equilibrium situation. Therefore, the deference of testing result, fitting coefficient and τ between adsorption and desorption will be discussed, and how the hysteresis phenomenon affects the sorption process as well as the connection between the phenomenon and the model will be showed.

Conclusion

A comparison of data and fitting result between the experiments and references will be carried out in this study. The PEK-mode will be used to fit the testing result and find out the characteristic time value. In addition, the other possible models would be discussed and compared with PEK-model to find the possible explanation of the physical meaning of the PEK-model.

Acknowledgment

Ce travail à été réalisé avec le soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) durant le projet EFEUR5 (ANR-15-CE08-0027) pour l'investissement dans les équipements expérimentaux.

Reference

Glass S.V., Boardman C.R., Thybring E.E., Zelinka, S.L. (2018) Quantifying and reducing errors in equilibrium moisture content measurements with dynamic vapor sorption (DVS) experiments. Wood Science and Technology, 52(4), 909-927.

Guo X., Wu Y., Xie, X. (2018) Water vapor sorption properties of cellulose nanocrystals and nanofibers using dynamic vapor sorption apparatus. Scientific Reports, 7(1), 1-12.

Hailwood A.J., Horrobin S. (1946) Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. Transactions of the Faraday Society, 42, B084-B092.

Hill C.A., Norton A., Newman G. (2010) The water vapor sorption behavior of flax fibers—Analysis using the parallel exponential kinetics model and determination of the activation energies of sorption. Journal of applied polymer science, 116(4), 2166-2173.

Himmel S., Mai C. (2016) Water vapour sorption of wood modified by acetylation and formalisation–analysed by a sorption kinetics model and thermodynamic considerations. Holzforschung, 70(3), 203-213.

Kachrimanis K., Noisternig M.F., Griesser U.J., Malamataris S. (2006) Dynamic moisture sorption and desorption of standard and silicified microcrystalline cellulose. European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics, 64(3), 307-315.

Kohler R., Alex R., Brielmann R., Ausperger B. (2006) A new kinetic model for water sorption isotherms of cellulosic materials. In macromolecular symposia (Vol. 244, No. 1, pp. 89-96). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Okubayashi S., Griesser U.J., Bechtold T. (2004) A kinetic study of moisture sorption and desorption on lyocell fibers. Carbohydrate Polymers, 58(3), 293-299.

Ross R.J. (2010) Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190.

Schmulsky R., Jones, P.D. (2011) Forest Products and Wood Science. An Introduction Sixth Edition. Willey–Blackwell A John Wiley and Sons Inc., Publication.

Thybring E.E., Boardman, C.R., Glass S.V., Zelinka S.L. (2019) The parallel exponential kinetics model is unfit to characterize moisture sorption kinetics in cellulosic materials. Cellulose, 26(2), 723-735.

Wilfred Jr A., Kollmann F.F. (1968) Principles of Wood Science and Technology. Springer.

Caractérisation du comportement d'assemblage bois avec broches métalliques - Lois de similitude et approche expérimentale

SOUSSEAU Yann[1], ELACHACHI Sidi Mohammed[1], CHAPLAIN Myriam[1], FAYE Carole[2], CATTEROU Thomas[2], GARCIA Patrice[2]

[1]Institut de Mécanique et d'Ingénierie, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex
[2]Institut technologique FCBA, allée de Boutaut, 33000 Bordeaux
yann.sousseau@u-bordeaux.fr

Mots clefs : Assemblages bois ; Lois de similitude ; Expériences à taille réduite ; Incertitudes ; Intervalles de confiance

Introduction

Réaliser des essais sur des bâtiments bois de moyenne et grande hauteur nécessite des moyens très coûteux. La solution proposée est de tester des maquettes réduites représentatives, dont la conception est basée sur des lois de similitude (Casaburo 2019; Coutinho 2016). Puis à partir des réponses relevées aux échelles réduites, les lois de similitude permettent d'en déduire celles à taille réelle. Pour cela, des facteurs de similitude sont définis, pour chaque variable x (paramètres ou grandeur d'intérêt), par le rapport $\lambda_x = x^{(F)}/x^{(R)}$, avec $x^{(F)}$ et $x^{(R)}$ respectivement les valeurs de x à l'échelle 1 (Full scale) et aux échelles réduites (Reduced scale). L'ensemble de valeurs associées à ces facteurs constitue une loi de similitude.

Les travaux suivants consistent à établir une loi de similitude pour le comportement mécanique d'assemblages bois par broche, en vue d'établir une loi de similitude pour la structure. Les grandeurs d'intérêt retenues sont la raideur élastique K_e et la force maximale F_u. Les paramètres à considérer sont les « modules » C (en N/m²) et les propriétés géométriques L (en m). Le même matériau est utilisé entre les échelles 1 et 1/3, le facteur de similitude en module λ_C est égal à 1 et celui en dimension λ_L ést égal à 3. Ainsi, en utilisant une méthode basée sur l'analyse dimensionnelle (Potter 2017; Wissmunn 1968), les facteurs de similitude théoriques pour les grandeurs d'intérêt sont

$$\begin{cases}[K_e] = [C][L] \\ [F_u] = [C][L]^2\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}\lambda_{Ke} = \lambda_C\lambda_L = 3 \\ \lambda_{Fu} = \lambda_C\lambda_L^2 = 9\end{cases} \quad (1)$$

avec $[x]$ désignant la dimension de la variable x.

Pour des raisons techniques, la réduction de certaines dimensions des éléments de nos assemblages (hauteur et épaisseur de la plaque métallique, hauteur de bois sous les broches (Fig. 1)) n'a pas pu être réalisée : ceci conduit à des distorsions géométriques. Cet article présente les facteurs de similitude obtenus sur la base d'essais réalisés aux échelles 1 et 1/3. La comparaison aux valeurs théoriques est analysée.

Caractérisation expérimentale du comportement des assemblages

Les essais sont réalisés selon la norme EN NF 26 891 (Norme d'essai NF EN 26891) afin de caractériser le comportement d'un assemblage bois-métal, connexion par 3 broches (Fig. 1). La plaque métallique est fixée au support et une charge verticale est appliquée sur l'éprouvette en bois (Fig. 1). Le déplacement relatif, glissement, entre la plaque métallique et le bois, est

enregistré par le suivi à l'aide de 2 caméras (une sur chaque face) de marqueurs A (sur la plaque) et B (sur le bois).

Pour chaque essai, une courbe force glissement est établie en calculant la moyenne des glissements au niveau des 2 côtés de l'assemblage, à partir de laquelle la raideur élastique K_e et la force maximale F_u sont calculées. La raideur K_e est obtenue par régression linéaire sur la phase de recharge (Xu 2009) entre les points A tel que $F = 0{,}1F_{u,\mathrm{th}}$ et B tel que $F = 0{,}4F_u$ (Fig. 2) ; $F_{u,\mathrm{th}}$ étant la force maximale théorique estimée de notre assemblage, et utilisée lors des phases de charge-décharge imposées par la norme (Norme d'essai NF EN 26891).

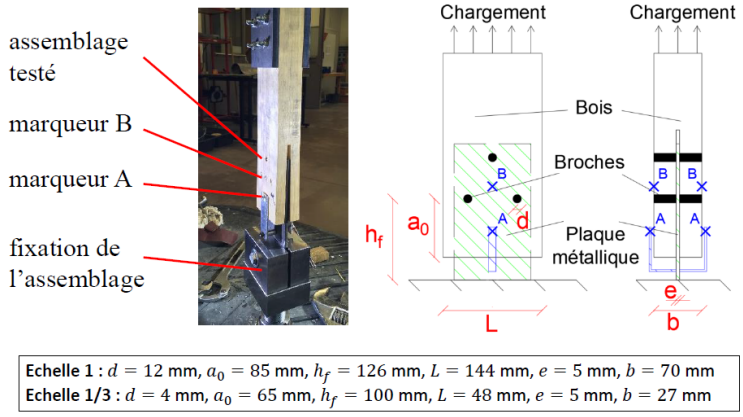


Fig. 1 : Assemblages testés

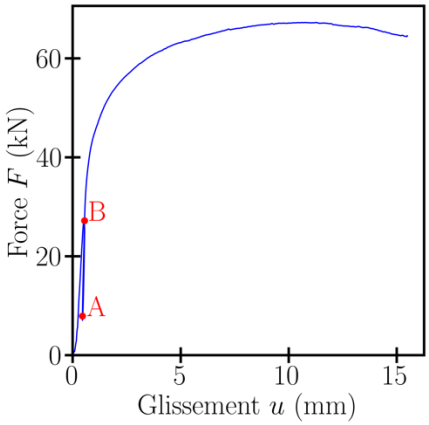


Fig. 2 : Courbe force déplacement expérimentale (échelle 1)

Ensuite, pour chaque échelle, les valeurs caractéristiques moyennes sont calculées à partir des différents essais (Tab. 1).

Tab. 1 : Caractéristiques expérimentales

	échelle 1 ($n^{(F)}$ =8 essais)		échelle 1/3 ($n^{(R)}$ = 10 essais)	
Caractéristique x	Moyenne $\overline{x^{(F)}}$	COV (%)	Moyenne $\overline{x^{(R)}}$	COV (%)
Raideur élastique K_e (MN/m)	174	18,5	44,2	19,3
Force maximale F_u (kN)	69,5	8,20	8,89	5,82

La dispersion est importante, il sera traité dans la partie suivante son impact sur les facteurs de similitude.

Evaluation des facteurs de similitude

Pour chaque caractéristique x étudiée, les facteurs de similitude expérimentaux sont calculés, puis comparés avec ceux théoriques $\lambda_x^{(\mathrm{th})}$ (Tab. 2). La moyenne expérimentale de λ_x, notée $\overline{\lambda_x}$, est égale au rapport des valeurs moyennes de x à l'échelle 1 (F) et réduite (R) (la barre supérieure indique la moyenne de la grandeur):

$$\overline{\lambda_x} = \overline{x^{(F)}}/\overline{x^{(R)}} \tag{1}$$

Son écart type σ_{λ_x} est donné par (6) :

$$\left(\sigma_{\lambda_x}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{x^{(\mathrm{F})}}}{\overline{x^{(\mathrm{R})}}}\right)^2 + \left(\sigma_{x^{(\mathrm{R})}} \frac{\overline{x^{(\mathrm{F})}}}{\left(\overline{x^{(\mathrm{R})}}\right)^2}\right)^2 \tag{2}$$

En plus des écarts entre les valeurs théoriques $\lambda_x^{(\mathrm{th})}$ et les moyennes expérimentales $\overline{\lambda_x}$, des dispersions importantes sont constatées sur les facteurs de similitude expérimentaux, du fait de la variabilité observée sur les caractéristiques aux échelles 1 et 1/3.

Il s'agit à présent de déterminer si ces écarts entre valeurs théoriques et moyennes expérimentales sont significatifs étant donnée la dispersion des résultats expérimentaux.

Tab. 2 : Facteurs de similitude, comparaison entre théorique et expérimental

Caractéristique x	Facteur théorique $\lambda_x^{(\mathrm{th})}$	Facteur expérimental λ_x		
		Moyenne $\overline{\lambda_x}$	Ecart type σ_{λ_x}	COV (%)
Raideur élastique K_e (N/m)	3	3,93	1,05	26,7
Force maximale F_u (N)	9	7,82	0,79	10,1

Sur la raideur

Un intervalle de confiance (Ayyub 2011) est établi, pour la moyenne estimée du facteur de similitude sur la raideur, $\mu_{\lambda_{Ke}}$. Pour cela, on considère que la variable λ_{Ke} suit une loi de distribution log normale, donc que $\overline{\ln \lambda_{Ke}} = \overline{\ln K_e^{(\mathrm{F})}} - \overline{\ln K_e^{(\mathrm{R})}}$ suit une loi normale, ainsi l'intervalle de confiance pour $\mu_{\ln \lambda_{Ke}}$ est obtenu par :

$$\begin{aligned} \overline{\ln \lambda_{Ke}} - q\sqrt{\frac{\left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{F})}}\right)^2}{n^{(\mathrm{F})}} + \frac{\left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{R})}}\right)^2}{n^{(\mathrm{R})}}} &\leq \mu_{\ln \lambda_{Ke}} \\ &\leq \overline{\ln \lambda_{Ke}} + q\sqrt{\frac{\left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{F})}}\right)^2}{n^{(\mathrm{F})}} + \frac{\left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{R})}}\right)^2}{n^{(\mathrm{R})}}} \end{aligned} \tag{3}$$

avec q le quantile pour la loi normale. Enfin, l'intervalle de confiance pour $\mu_{\lambda_{Ke}}$ est obtenu en considérant :

$$\mu_{\lambda_{Ke}} = \exp\left(\mu_{\ln \lambda_{Ke}} + \left(\sigma_{\ln \lambda_{Ke}}\right)^2/2\right) \tag{4}$$

avec $\left(\sigma_{\ln \lambda_{Ke}}\right)^2 = \left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{F})}}\right)^2 + \left(\sigma_{\ln K_e^{(\mathrm{R})}}\right)^2$. Le risque α est la probabilité que $\mu_{\lambda_{Ke}}$ ne soit pas dans l'intervalle de confiance, et q est le quantile $1 - \alpha/2$. Pour $\alpha = 0{,}05$, on a $3{,}39 \leq \mu_{\lambda_{Ke}} \leq 4{,}88$, la valeur $\lambda_{Ke}^{(\mathrm{th})}$ n'est pas contenue dans cet intervalle. Autrement dit, la probabilité que $\mu_{\lambda_{Ke}}$ soit égale à la valeur théorique $\lambda_{Ke}^{(\mathrm{th})}$ est inférieure à 0,05, donc cette hypothèse est rejetée. L'écart entre les valeurs théorique et moyenne expérimentale est donc significatif. Cet écart pourrait en partie s'expliquer par les distorsions géométriques : à l'échelle 1/3, par rapport à la configuration vérifiant les relations de similitude, la hauteur de la plaque est supérieure, donc la raideur K_e est inférieure (la plaque, chargée verticalement, se déformant plus), et le facteur

λ_{Ke} est supérieur. Une modélisation de la configuration à l'échelle réduite avec distorsion est en cours de réalisation. Elle permettra d'évaluer son impact sur le facteur de similitude.

Sur la force maximale

Pour le facteur de similitude sur la force maximale, l'intervalle de confiance est $7{,}34 \leq \mu_{\lambda_{Ke}} \leq 8{,}39$, avec $\alpha = 0{,}05$. La valeur $\lambda_{Fu}^{(\mathrm{th})}$ n'est pas contenue dans l'intervalle de confiance, de nouveau l'écart constaté entre les valeurs théorique et moyenne expérimentale est significatif. Cet écart peut être dû à l'effet d'échelle matériel (Fryer 2018) (bois et / ou acier), correspondant à une augmentation des contraintes limites à l'échelle 1/3, donc une augmentation de $F_u^{(\mathrm{R})}$ et ainsi une diminution de λ_{Fu}. Enfin, cet écart peut aussi être dû aux distorsions géométriques. En effet, par rapport à la configuration vérifiant les relations de similitude, la hauteur de bois sous les broches est supérieure, donc la force F_u est supérieure (car il y a moins d'effets de bords), et le facteur λ_{Fu} est inférieur.

Conclusion

Ces travaux sont la première étape d'un programme de recherche consistant à établir des lois de similitude pour étudier le comportement mécanique de bâtiments en bois de grande hauteur. Tout d'abord, des lois de similitude ont été établies, à l'aide d'une analyse dimensionnelle, pour le comportement d'assemblages bois. Puis des essais de caractérisation ont été réalisés sur ces assemblages : des écarts significatifs ont été constatés entre lois de similitude théoriques et expérimentales, du fait des distorsions géométriques.

Par la suite, ces facteurs de similitude doivent être introduits dans la loi de similitude relative au comportement, statique et dynamique, de la structure.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ADEME et le CODIFAB pour leur soutien financier.

Références

Ayyub B. M, McCuen R.H. (2011) Probability, Statistics, and reliability for engineers and scientists, Third Edition. 663. Chapman & Hall Book.

Casaburo A., Petrone G., De Rosa S. (2019) A review of similitude methods for structural engineering. Applied Mechanics Reviews 71(3): 32.

Coutinho C.P., Baptista A.J. (2016) Reduced scale models based on similitude theory: a review up to 2015. Engineering Structures 119: 81-94.

Fryer B.K., Foster R.M., Ramage M.H. (2018) Size effect of large-scale timber columns. World Conference of Timber Engineering. Seoul, Republic of Korea. 7.

NF EN 26891. (1991). Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation. AFNOR.

Potte M., Wiggert D., Ramadan B. (2017) Dimensional Analysis and Similitude. Mechanics of Fluids, Fifth Edition. 816. Cengage learning.

Wissmunn J.W. (1968) Dynamic Stability of Spacevehicles. Rapport. 53

Xu B.H. (2009) Modélisation du comportement mécanique d'assemblages bois avec prise en compte de critères de rupture. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Essais de durabilité naturelle au champ de huit (8) essences de bois malagasy : comparaison des indices de conservation à 6 mois et à 60 mois

RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina, RAVELONANOSY Harinomena Rinah, RAZAFINARIVO Ravo Nantenaina Gabriella, RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo, RAJEMISON Andraina, RAMANANANTOANDRO Tahiana

Université d'Antananarivo, Antananarivo 101, Madagascar
andriambelo.radonirina@gmail.com

Mots clefs : durabilité naturelle ; essai au champ ; indice de conservation ; bois ; Madagascar

Contexte et objectifs

Les essais de durabilité naturelle au champ nécessitent plusieurs années pour avoir de résultats fiables, contrairement aux essais de durabilité en laboratoire qui nécessitent juste quelques mois. De plus, les essais au champ ont pour avantages que les résultats obtenus reflètent bien la réalité qui est propre à chaque site car les agents de dégradation biologique du bois y sont différents et les conditions environnementales ne sont pas contrôlables. Mais puisque ces essais de durabilité naturelle au champ nécessitent plusieurs années, il peut être intéressant de comparer les résultats de ces essais obtenus à des stades précoces avec ceux obtenus à des âges avancés pendant laquelle des ruptures de la plupart des éprouvettes utilisées sont constatées. D'où, cette étude pour comparer les résultats des essais de durabilité naturelle au champ à des stades précoces (6 mois) avec les résultats à des stades avancés (60 mois) en se basant sur l'indice de conservation selon Edlund et al. (2006), et menés dans 2 sites aux conditions environnementales différentes à Madagascar. Ce travail contribue à l'amélioration de la connaissance des espèces malagasy puisque la plupart des propriétés des espèces malagasy sont peu connues (Rakotovao et al. 2006). Les objectifs de cette étude consistent donc à (i) comparer l'état de dégradation des bois de 8 essences de Madagascar obtenu dans des essais de durabilité naturelle au champ à 6 mois et à 60 mois, et à (ii) analyser l'interaction « espèce × site » sur l'état de dégradation du bois.

Matériels et méthodes

Les essais de durabilité naturelle ont été installés dans 2 sites dont :

- le site d'Antananarivo sur les hauts plateaux (climat tropical d'altitude, température moyenne de 25°C, hygrométrie de 64%, pluviométrie annuelle de 1146 mm, température du sol de 20°C, humidité du sol de 23%, sol ferrallitique à texture sablo-argileuse), l'essai a été installé dans un milieu avec une ambiance forestière (sous des arbres)
- le site de Mandraka sur le versant oriental de la falaise (climat humide frais, température moyenne de 23°C, hygrométrie de 77%, pluviométrie annuelle de 1661 mm, température du sol de 21°C, humidité du sol de 34%, sol ferrallitique rajeuni à texture argilo-limoneuse), l'essai a été installé sur terrain nu.

L'étude concerne huit (8) essences de bois collectées dans la forêt humide de Mandraka, comprenant sept (7) espèces autochtones malagasy 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 qui est *Cedrela odorata*.

Les essais de durabilité naturelle au champ ont été installés en 2015 suivant la norme EN 252 (1989). L'état de dégradation des éprouvettes a été caractérisé en utilisant l'indice de conservation d'Edlund (2006) obtenu à 6 mois, 16 mois et 60 mois après la mise en place des essais. L'état de durabilité naturelle obtenue avec cet indice de conservation comporte 5 classes dont la classe « très durable » avec un IC variant de 100 à 90% regroupant des échantillons absolument intacts ne portant ni de trace dégradation de la couleur ni de trou ou de galerie, et la classe « non durable » regroupant les échantillons ne présentant plus aucune cohésion, avec un IC variant de 25 à 0%, donc avec une dégradation très forte (EN 252, 1989 ; Edlund et al., 2006).

Résultats et discussion

L'indice de conservation varie significativement selon les espèces dans chacun des 2 sites (α=0.1%) à 60 mois (Fig. 1). Et il y a un effet site hautement significatif (α=1%), les éprouvettes dans le site d'Antananarivo étant plus dégradées (IC plus faible) que ceux de Mandraka. Ceci peut être expliqué par l'exposition au soleil plus élevée de l'essai à Mandraka, celui d'Antananarivo étant moins exposé au soleil et avec plus de biomasse au sol. Cela confirme les études de Colín-Urieta et al. (2018).

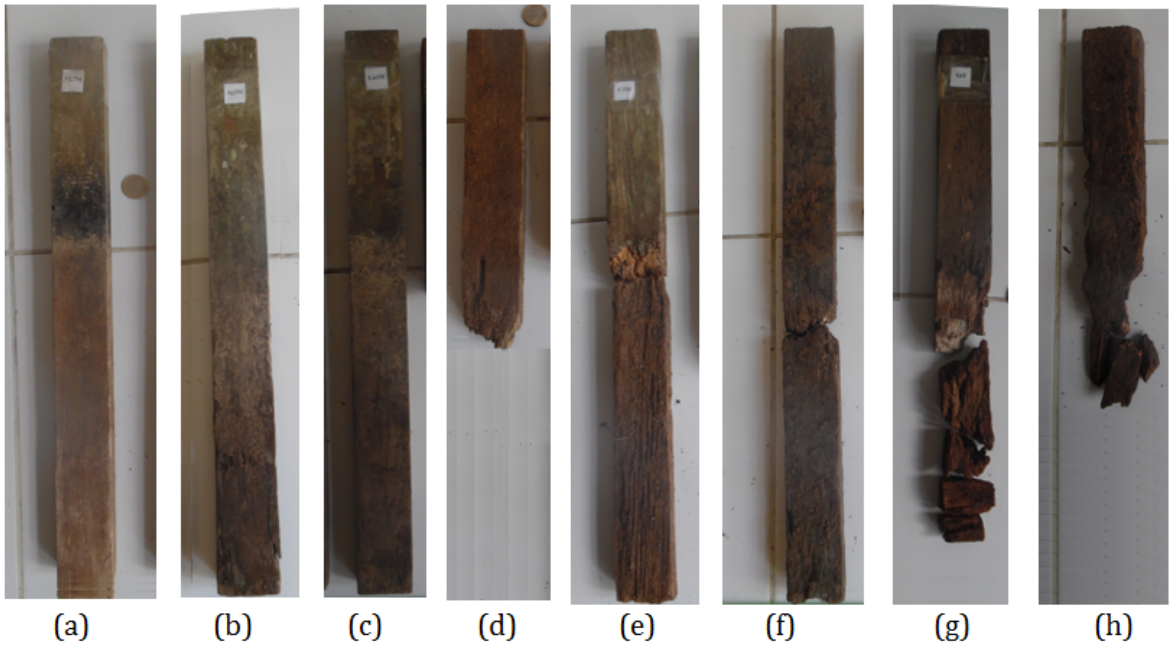


Fig. 1 : Etat des éprouvettes utilisées dans l'essai de durabilité naturelle au champ de la station de Mandraka (a :Valanirana, b :angavo, c :lalona, d :ambora, e :cedrela, f :felamborana, g :dipaty, h :kijy)

Concernant l'interaction « espèce × site », il a un effet significatif (α=5%) sur l'indice de conservation des espèces à 60 mois. La sensibilité de la dégradation des espèces à la variation de site (conditions environnementales) est donc différente selon les espèces, le classement des espèces dans les 2 sites est donc différent. Autrement dit, les espèces les plus dégradées dans le site de Mandraka ne sont pas les plus dégradées à Antananarivo.

Concernant le classement des espèces selon la durée de l'essai, pour chacun des 2 sites, le classement des espèces reste à peu près stable de 16 mois à 60 mois, même s'il y a certaines espèces qui changent de classement (Fig. 2). Mais les résultats obtenus à 6 mois ne sont pas encore concluants, les espèces présentant un indice de conservation élevé à 6 mois ne sont pas les plus durables à 60 mois, surtout si les conditions environnementales ne sont pas très favorables à la dégradation des éprouvettes.

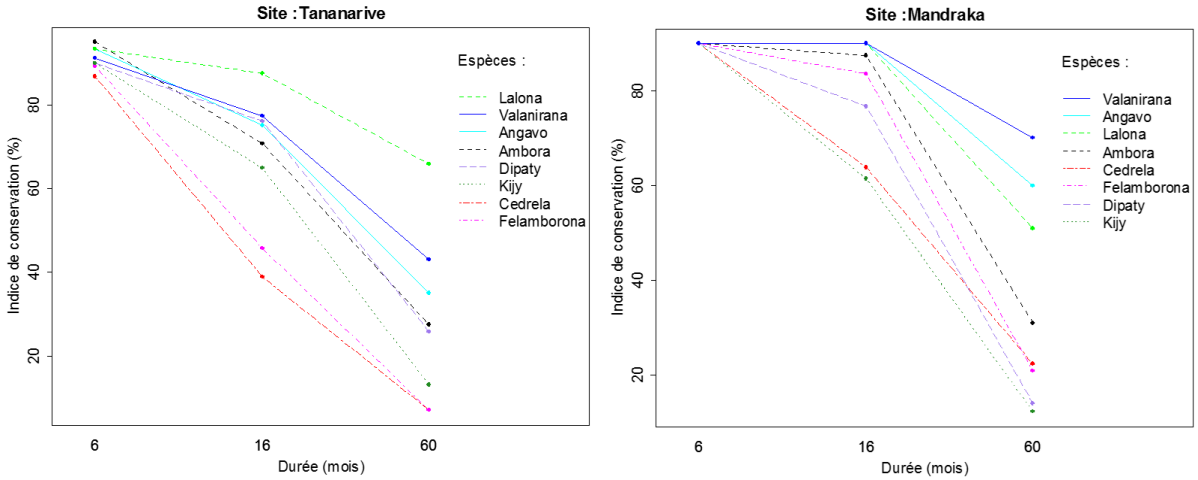


Fig. 2 : Classement des 8 espèces selon leur indice de conservation de 6 à 60 mois dans les 2 sites d'études (Tananarive et Mandraka)

Conclusion et perspectives

L'état de dégradation pour chaque espèce dans chaque site est différent car les conditions environnementales et les agents de dégradation présents sont différents. À partir de 16 mois, le classement des espèces en fonction de la durée des essais reste à peu près stable. Les résultats obtenus à des stades avancés de la dégradation devraient être comparés aux résultats des essais de durabilité naturelle obtenus en laboratoire afin d'améliorer les protocoles mis en place. Les prochains travaux consisteront aussi à caractériser la durabilité naturelle à travers la perte de masse des échantillons pour être plus précis car l'indice de conservation utilisé dans cette étude n'est qu'une appréciation qualitative visuelle de l'état de dégradation du bois. Puis, les résultats obtenus seront corrélés avec les propriétés chimiques des espèces car elles influencent fortement la durabilité naturelle des bois.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au Laboratoire des Radioisotopes Antananarivo (LRI), et l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) qui ont financé le projet SPIRMADBOIS à travers lequel cette étude a été effectuée.

Références

Colín-Urieta S,, Carrillo-Parra A., Rutiaga-Quiñones J.G., López-Albarrán P., Gabriel-Parra R., Ngangyo-Heya M. (2018) Natural durability of seven tropical timber species in ground contact at three sites in México. Journal of Tropical Forest Science 30(1): 75–81

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 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.

Développement d'un nouveau composite à base de déchets industriels de cuir et de colle à bois

DIAZ Léa[1], LEROYER Léo[1], FERNANI Valérie[2], CHARRIER Bertrand[1]

[1]Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan, France
[2]API'UP 108 Avenue Jean Lartigau, 40130 Capbreton
lea.diaz@etud.univ-pau.fr

Mots clefs : Déchets industriels ; cuir ; upcycling ; panneaux de particules ; colle à bois ; thermocompression ; nouvelle matière

Contexte et objectifs

La société Api'Up, spécialiste en upcycling industriel, développe des activités durables autour de l'économie circulaire par le biais d'un atelier « du déchet au design », qui produit en série des objets neufs à partir de déchets collectés en région nouvelle Aquitaine. L'entreprise propose une gamme de mobiliers qui s'appuie sur la valorisation éco-responsable et un procédé d'upcycling industriel qui permet de concevoir et de fabriquer des mobiliers neufs à partir de matières récupérées. Actuellement, les applications commerciales sont essentiellement menées sur le domaine de l'ameublement et de l'objet mais d'autres applications sont déjà à l'étude.

En 2018, la société API UP a souhaité collaborer avec l'équipe Xylomat – IPREM de Mont de Marsan, afin de valoriser des déchets industriels de cuir.

Trois partenaires se sont associés au travers du projet "MATERIA" : API'UP, l'IPREM-Xylomat et le studio de design parisien « La Racine ». Les travaux communs ont permis de créer une nouvelle gamme de produits à base de matière « upcyclée » et de colle bio-sourcée traditionnellement utilisée dans l'industrie du bois. Ceci, en mettant en place un programme d'innovation matières et design produit éco-responsable intégrant des travaux de R&D sur les matières et la stratégie marketing.

Un des objectifs était de proposer une offre sur le long terme afin d'industrialiser là où certaines initiatives restent au stade de la pièce unique. Ceci, afin de proposer des matériaux durables et guarantir un mobilier conçu en France à partir d'au moins 99% de matériaux recyclés et dont l'objectif de recyclabilité visait elle aussi 100%. Lors de la phase de travail de R&D il a été retenu en premier lieu de transformer ces matières premières en panneaux par thermocompression.

Matériels et méthodes

Matières premières

La matière première principale est ici un déchet issu de l'industrie de cuir régionale. Il se présente sous forme de chutes de coupes qui proviennent d'entreprises issues de deux secteurs : la maroquinerie (avec un tannage majoritaire au chrome, plutôt souple et d'une grande diversité de couleurs) et la sellerie équestre (avec un tannage végétal majoritaire, plutôt rigide et de couleurs sombres).

Les chutes de cuir collectées ont été broyées par la société Api'Up en différentes granulométrie (3 mm ; 1,5mm ; 0,5 mm) avec un broyeur industriel.

Le mélange collant utilisé est d'origine bio-sourcée et a été employé traditionnellement dans l'industrie du bois pour le collage du bois massif. Une démarche de dépôt de brevet étant en cours, la composition détaillée de la formulation est confidentielle.

Mise en œuvre

Les panneaux ont été pressés par thermocompression au laboratoire à l'aide de deux presses à plateaux chauffant :

- Presse de laboratoire Carver (20×20 cm, 24 Tonnes) utilisée pour la phase d'optimisation
- Presse pilote de marque Pagnioni Monza / 3R (60×60 cm, 100 Tonnes) employée pour la fabrication de prototypes et la pré-production

Les conditions de mise en forme (pression, durée de pressage et température des plateaux chauffant) restent confidentielles. Les panneaux en pré-production sont mis en forme par thermocompression dans un moule conçu au laboratoire.

En premier lieu, deux moules en Polyoxyméthylène (POM), de tailles réduites pour la phase d'optimisation, puis un moule en aluminium chemisé avec du POM pour le prototypage ont été conçus au laboratoire sur le logiciel Catia V5. Les moules ont été usinés par une entreprise sous-traitante.

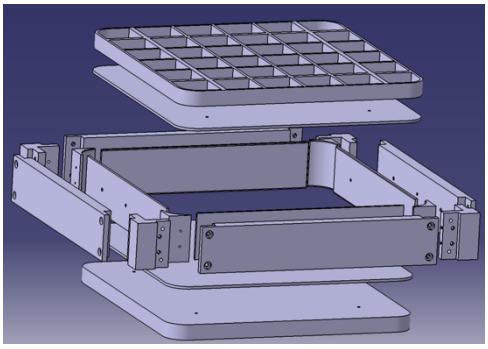


Fig. 1: Moule conçu sur le logiciel Catia V5 pour la mise en forme des panneaux

Analyse

Les mesures de couleurs ont été réalisées avec un spectrocolorimètre portable X-Rite Pantone Ci62. L'appareil a été utilisé avec le réglage du luminant D50/10 (lumière du jour) et SPEX / SPIN. Les résultats sont donnés en code couleur du système colorimétrique L*a*b*.

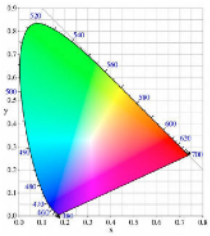


Fig. 2 : Diagramme de chromaticité

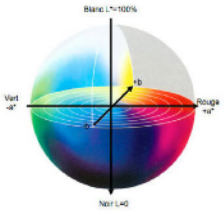


Fig. 3 : Espace colorimétrique L*a*b*

L'espace chromatique L*a*b* CIE, généralement nommé CIELAB, est un espace colorimétrique particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L* dérive de la luminance de la surface ; les deux paramètres a* et b* expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté. L'espace chromatique CIELAB est défini à partir de l'espace CIE XYZ. Il présente l'avantage d'une répartition des couleurs plus conforme à la perception des écarts de

couleur par le système visuel humain. Les mesures ont été réalisées selon la norme internationale ISO 11664.

Des mesures de brillance ont été réalisées selon la norme ISO 2813, avec un brillancemètre BYK Garder, micro-tri-gloss. Les panneaux de cuir produits sont un matériau de type dit « bas brillant » ce qui nous a amené à utiliser l'angle de mesure du test à 85°.

Résultats et discussion

Réalisation des panneaux

Une phase de recherche exploratoire, après de nombreuses optimisations, nous a permis de déterminer le choix du mélange collant. Celui qui a été retenu est une colle traditionnelle utilisée pour le collage du bois massif. Une large phase de R&D sur la typologie du cuir, la granulométrie, la composition et la proportion de la colle ainsi que l'optimisation du cycle de presse (temps, température, pression) et de la densité du panneau ont permis de mettre au point le procédé. Au cours de cette phase de R&D il a été arbitré avec l'entreprise le choix de se diriger vers des panneaux d'occultation visuelle possédant des performances acoustiques avérées.

Mesures de couleurs

L'observation visuelle de la surface d'un même panneau met en évidence une différence de teinte des grains de cuir. Les mesures de couleur ont permis de confirmer la disparité chromatique, comme présenté dans la Fig. 4. Les résultats sont exprimés par leurs valeurs L*a*b* données par l'appareil.

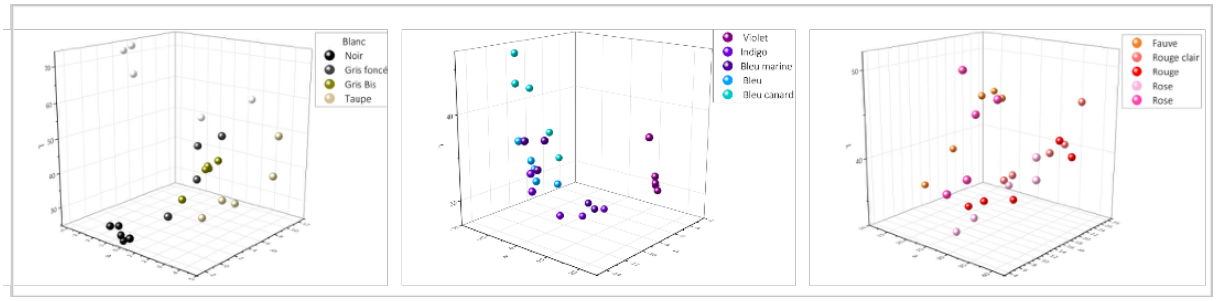


Fig.4 : Mesures de couleurs réalisées sur 15 panneaux de couleur différente à raison de 5 mesures par panneau.

Par ailleurs les couleurs analysées par le spectrocolorimètre ne correspondent pas au ressenti visuel du panneau. Le fait que ceux-ci aient une homogénéité de couleur relative, est à l'origine du problème. Des recherches sont en cours sur cet aspect sensoriel. Dans le cadre de la commercialisation, cette réflexion sensorielle est importante afin de pouvoir réaliser un nuancier fidèle pour la future marque. L'élaboration de ce nuancier sera nécessaire pour optimiser le tri en amont afin de maîtriser la production. Celle-ci sera fonction des quantités disponibles tout en assurant une certaine reproductibilité nécessaire à la production de panneaux haut de gamme.

Une variation de la brillance a été observée en fonction de la granulométrie. Les grains de plus grande granulométrie ont présenté une brillance plus élevée, probablement due à une surface plus lisse. Le contrôle de la granulométrie est donc un élément essentiel pour l'aspect esthétique.

Conclusion et perspectives

Ce projet a montré la faisabilité de l'élaboration d'un nouveau matériau upcyclé à base d'une colle traditionnellement utilisée pour le bois. Plusieurs phases de prototypage ont eu lieu, pour améliorer l'aspect esthétique des panneaux (congés d'arrêtes, aspect pelucheux…). Les derniers essais réalisés en septembre 2020 ont permis d'obtenir des finitions satisfaisantes pour l'entreprise et la phase d'industrialisation est en cours. Les mesures de couleur ont permis de préciser le niveau de disparité des panneaux afin de valoriser cette nouvelle matière en opposition avec l'uniformité de matériaux industriels classiques. Le choix marketing s'est tourné vers cette mise en valeur d'une matière première upcyclé. Le travail actuel se porte sur deux achats qui seront réalisés par la société API'UP : une presse industrielle (en cours de dimensionnement) et un séchoir à panneaux. Aujourd'hui, cette nouvelle matière remplit les critères haut de gamme demandés initialement et va pouvoir être mise en avant sur le marché français de l'aménagement intérieur.

Références

Norme ISO/CIE 11664-1:2019 Colorimétrie — Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie

Norme ISO 2813:2014 Peintures et vernis — Détermination de l'indice de brillance à 20 degrés, 60 degrés et 85 degrés

De la douglasaie aux propriétés mécaniques de poutres LVL

FRAYSSINHES Rémy, GIRARDON Stéphane, COLLET Robert, DENAUD Louis

Arts et Métiers, LaBoMaP (EA 3633), Rue Porte de Paris, 71250 Cluny, France
Remy.Frayssinhes@ensam.eu

Mots clefs : douglas ; déroulage ; modélisation mécanique ; poutres LVL

Introduction et contexte

Cette étude, a pour but de proposer un modèle capable d'estimer quantitativement et qualitativement le potentiel d'une parcelle de douglas, dont on connait certaines données sylvicoles, à produire des poutres LVL destinées au marché de la construction. Le modèle développé doit permettre d'intégrer l'effet de la croissance des arbres, et en particulier l'influence de la déviation de l'angle du fil au voisinage des nœuds, sur les propriétés mécaniques de produits constitués de placages déroulés.

Méthode et modélisation

Nous avons recherché des placettes représentatives de la ressource et d'itinéraires sylvicoles « contrastés » dont la définition, en particulier de la branchaison, permet d'utiliser un modèle de déroulage virtuel. Les équipes de l'ONF et d'INRAE (UMR Silva) nous ont offert la possibilité de travailler sur des données d'arbres de la forêt du Grison (parcelle expérimentale de l'ONF) issue de la base de données « ModelFor » qui remplissaient ces caractéristiques.

Modélisation de la position et de la taille des nœuds sur les placages ainsi que de leur impact sur l'orientation des fibres

Un déroulage virtuel et une modélisation de l'orientation des fibres (Frayssinhes et al. 2020) permettent de prédire la cartographie d'orientation locale des fibres des placages.

Les arbres sont tronçonnés virtuellement en billon de longueur 2500 mm (dimension courante d'une dérouleuse industrielle) jusqu'à un diamètre de 200 mm (seuil de rentabilité du procédé de déroulage). Les placages sont ensuite massicotés à une largeur de 1250 mm (Fig. 1).

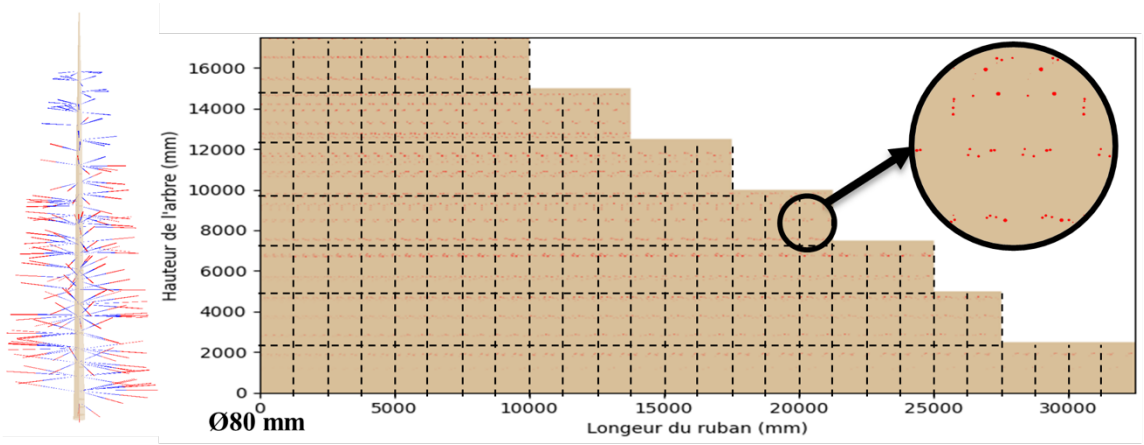


Fig. 1 : Déroulage virtuel d'un arbre modélisé, l'origine à gauche des rubans correspond au diamètre résiduel des noyaux de déroulage (80 mm) ; les cercles rouges, sur le placage, corespondent aux nœuds

Modélisation de la masse volumique des placages

La masse volumique mesurée sur des rondelles extraites des arbres de la forêt domaniale du Grison, par les équipes de INRAE, a été comparée au modèle de Kimberley et al. (2017) (Fig. 2). Ce modèle semble pertinent et a été appliqué à tous les arbres de la base de données dans leur hauteur afin de déterminer une masse volumique associée aux placages déroulés.

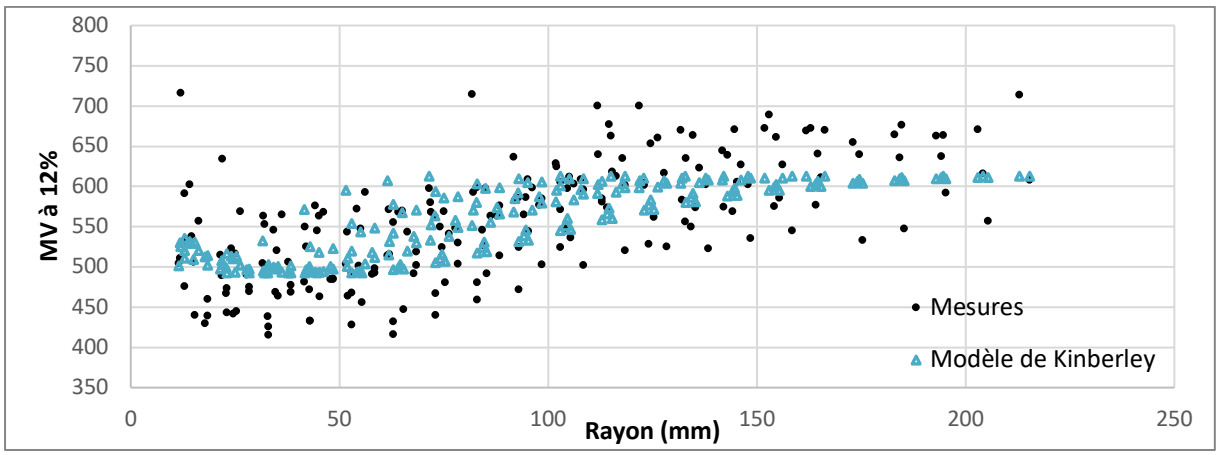


Fig. 2 : Comparaison de la masse volumique des arbres de la forêt domaniale du Grison mesurée sur les premières rondelles et modélisée

Modélisation des propriétés mécaniques des placages et des poutres LVL

En connaissant la masse volumique et l'orientation des fibres de chaque placage, il est possible de déterminer les propriétés mécaniques suivant le modèle de Viguier et al. (2018). Le module d'élasticité moyen de chaque placage a pu être déterminé suivant sa position dans l'arbre (Fig. 3).

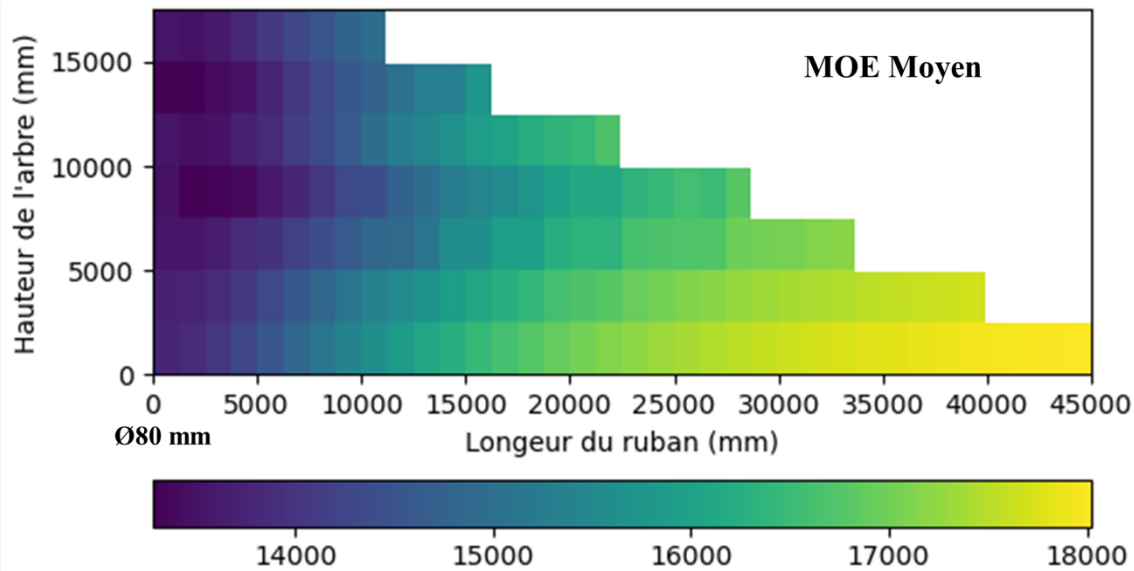


Fig. 3 : Module d'élasticité moyen modélisé pour les placages issus d'un arbre de la forêt du Grisons (MPa). L'origine à gauche des rubans correspond au diamètre résiduel des noyaux de déroulage (80 mm)

Le déroulage virtuel ayant permis de produire des placages d'une dimension de 3x1250x2500 mm^3, des panneaux virtuels ont été reconstitués en collant 15 placages pour réaliser un panneau de 45x1250x2500 mm^3. Ces panneaux ont ensuite été délignés en 10

poutres de 45x125x2500 mm et un essai de flexion virtuel (suivant la norme EN 408 (voir Fig. 4) a permis de déterminer les propriétés mécaniques de ces poutres.

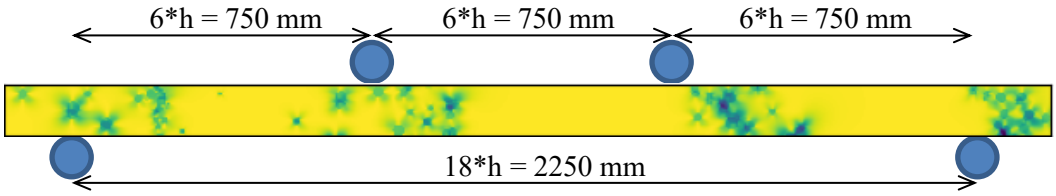


Fig. 4 : Spécification de l'essai de flexion virtuel suivant la norme EN 408

Résultats et discussion

Le modèle complet a été utilisé afin d'estimer les propriétés mécaniques de poutres LVL de douglas produites à partir d'arbres issus de différents scénarios sylvicoles. Les poutres issues de 15 arbres (5 en sylviculture dynamique, 5 en intermédiaire et 5 en témoin) ont été modélisées. Les résultats (Fig.5) permettent d'apprécier le bénéfice d'un élagage à 20 ans. Des gains de 4% pour le MOE et de 7% pour le MOR sont observés pour les poutres constituées de placages d'aubier. Cependant des gains moins marqués de 1.7% pour le MOE et de 4.8% pour le MOR sont observés pour les poutres constituées de placages de duramen. Ceci semble cohérent du fait que l'élagage supprime les nœuds principalement dans l'aubier. A noter que les poutres constituées de placages d'aubier ont en moyenne des propriétés mécaniques supérieures (+7,58% en MOE et +8,47 MOR) à celles constituées de placages de duramen.

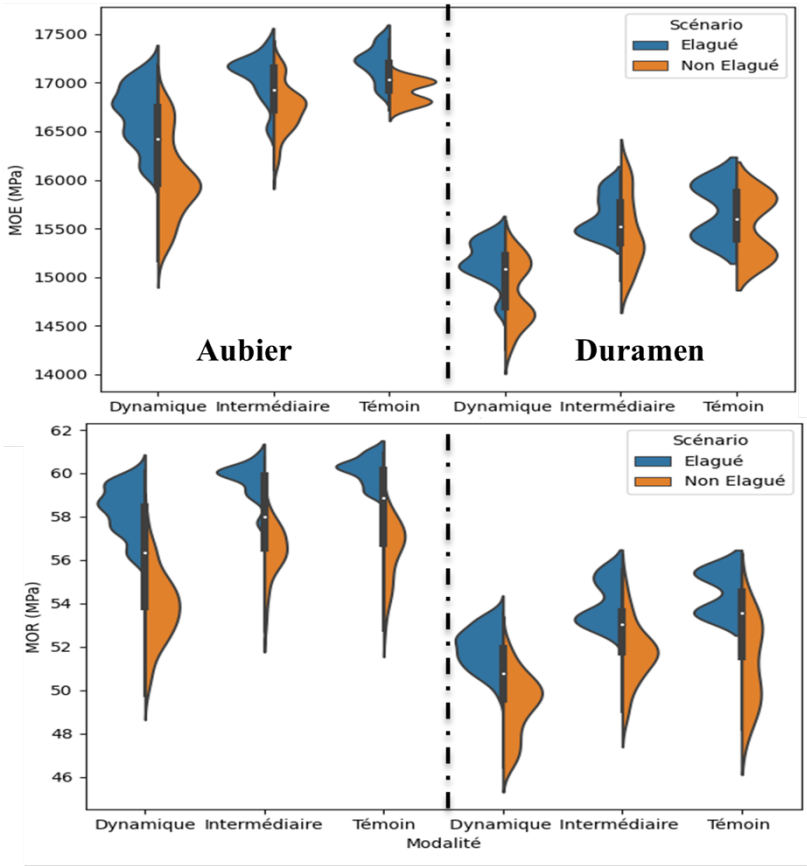


Fig. 5 : Comparaison des propriétés mécaniques entre les poutres LVL constituées d'arbres élagués et les poutres LVL constituées d'arbres non élagués

Conclusion et perspective

Le modèle développé au cours de ces travaux permet d'estimer les propriétés mécaniques de poutres LVL de douglas, à partir de données (géométrie du tronc, branchaison) observables à l'extérieur des arbres issus d'une parcelle.

Ce modèle constitue un outil d'aide à la décision pour la conduite des peuplements forestiers, mais aussi pour les acheteurs qui pourront estimer le potentiel d'une parcelle destinée au déroulage. Dans ce cas il sera nécessaire de modéliser chaque arbre (forme, branchaison…) afin de prédire les qualités mécaniques de poutres LVL ou de panneaux de contreplaqué. L'utilisation du LIDAR, dans un avenir proche, permettra de modéliser la géométrie des tiges et ainsi permettre une estimation du potentiel mécanique de la parcelle scannée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Bourgogne-Franche-Comté et la DRAAF de Bourgogne-Franche-Comté sous l'égide du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, les principaux financeurs des travaux de thèse dans laquelle s'inscrit cette étude.

Ces travaux n'auraient pu être réalisés sans l'accompagnement des équipes de l'INRAE (UMR Silva), de l'ONF et sans les données du réseau groupe DOUGLAS du GIS Coopérative de données qui nous ont fourni les données de la forêt domaniale du Grison.

Références

Frayssinhes R, Girardon S, Denaud L, Collet R (2020) Modeling the Influence of Knots on Douglas-Fir Veneer Fiber Orientation. Fibers 8:54. https://doi.org/10.3390/fib8090054

Kimberley MO, McKinley RB, Cown DJ, Moore JR (2017) Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir. New Zealand Journal of Forestry Science 47:. https://doi.org/10.1186/s40490-017-0096-0

Viguier J, Bourgeay C, Rohumaa A, et al (2018) An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber. Construction and Building Materials 181:146–155. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050

Architecture et développement territorial en Auvergne-Rhône-Alpes : le cas de la filière bois locale - HaDEcoT-Bois

JOFFROY Thierry, MAZEL Ivan, RODRIGUES-SOARES David, SIEFFERT Yannick

AE&CC-ENSAG-UGA, 3SR, Grenoble, France
soares.d@grenoble.archi.fr

Mots clefs : bois ; filière locale ; habitabilité ; construction ; architecture

Contexte

Comment mieux valoriser l'usage du bois d'œuvre local dans une logique de soutenabilité et de transition socio-écologique ?

Cette recherche part de l'hypothèse que le partage d'une culture de la construction bois entre les acteurs est une condition indispensable pour le développement des filières locales de bois construction.

Pour cela il est proposé de travailler à partir des questionnements, issus d'enquêtes de terrain après des acteurs territoriaux, de penser la valorisation des matériaux locaux et ainsi la création régionale de valeur ajoutée sur l'ensemble de la chaîne depuis la forêt jusqu'à la mise en œuvre.

Objectifs

Le projet HaDEcoT-Bois porte sur la filière bois de construction comme potentiel de développement économique des territoires d'Auvergne-Rhône-Alpes, riches en ressources forestières et possédant déjà un tissu entrepreneurial dans ce secteur. Ce projet est porté par le Laboratoire Architecture, Environnement et Cultures Constructives (AE&CC) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG), membre de l'Université Intégrée UGA, lauréat de l'appel à projet Pack Ambition Recherche de la Région Auvergne Rhône Alpes. Réalisé en partenariat avec le laboratoire 3SR (CNRS/G-INP/UGA), il sera mené dans le cadre de l'AAP Pack Ambition Recherche de la région Auvergne Rhône Alpes en partenariat avec de nombreux acteurs déjà impliqués à différents niveaux de la réflexion autour de la filière : institutionnels, organismes représentants les milieux professionnels et des acteurs socio-économiques de la filière.

Matériel et méthode

Le principe fondamental adopté pour ce projet de recherche est un travail itératif réalisé à partir des questionnements des acteurs socio-économiques partenaires en adéquation avec la demande sociale, pour explorer les besoins d'acquisition de connaissances et de savoir-faire.

L'axe principal d'investigation porte sur une analyse comparée des cultures constructives et dynamiques au sein de trois territoires régionaux possédant des filières bois avec différents niveaux de développement, part de marchés et nombre et échelles d'entreprises : l'Isère, l'Ardèche et l'Auvergne.

Une analyse sera menée sur des opérations publiques et privées, visant à comprendre les formes de collaboration, les logiques constructives, le potentiel et les limites de diffusion de solutions innovantes via la pratique de « projet démonstrateur ».

Des axes secondaires seront développés sur la caractérisation mécanique, sur l'empreinte carbone, l'analyse de l'offre et la demande en bois d'œuvre de proximité, etc.

Un post-doctorant Ivan Mazel, est associé à ce travail pour une comparaison des dynamiques de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec celles d'autres régions en France et en Europe (cf. résumé « Reproductibilité des projets architecturaux en bois local dans les territoires vosgiens : édifices exemplaires et modalités de reproduction de l'approvisionnement en grumes et des procédés constructifs », Ivan Mazel, 9èmes journées du GDR 3544, 2020).

Contribution de la Spectroscopie Proche Infra Rouge et des méthodes chimiométriques de classification non supervisée dans la révision taxonomique des espèces de *Dalbergia* de Madagascar

RAOBELINA Andry Clarel[1], CHAIX Gilles[2, 3], RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1]

[1]Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Antananarivo 101, Madagascar
[2]CIRAD - UMR AGAP, Montpellier, France
[3]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Institut Agro, Montpellier, France
andryclarel@gmail.com

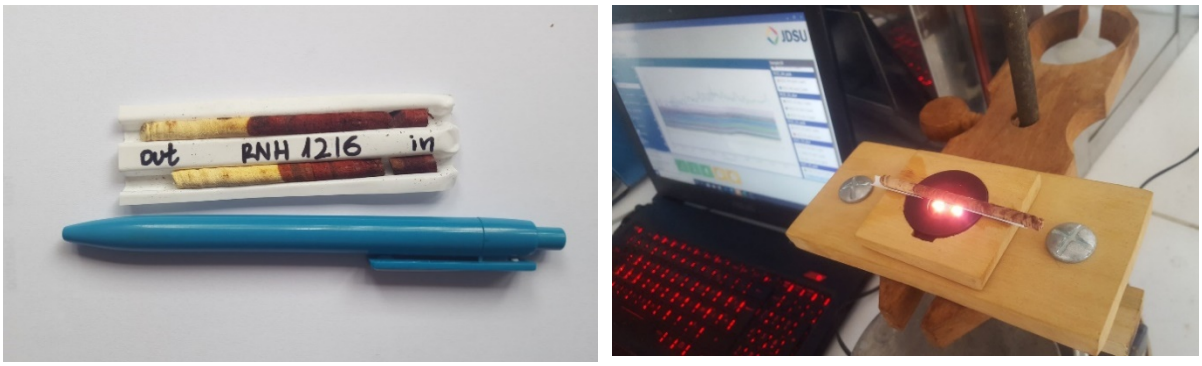
Mots clefs : Analyse en Composantes Principales ; Classification Ascendante Hiérarchique ; classification non supervisée ; *Dalbergia* ; Spectroscopie Proche InfraRouge

Contexte et objectif

Dalbergia est un genre regroupant des arbres, des arbustes et des lianes des zones tropicales, notamment Madagascar (Saha et al. 2013). La description et la révision taxonomique des espèces appartenant au genre *Dalbergia* de Madagascar ont été réalisées par Bosser et Rabevohitra (1996, 2005) et Du Puy et al. (2002). À l'issue de cette révision, 48 espèces ont été reconnues dont 47 sont endémiques de l'île, incluant 28 espèces de grands arbres. Des difficultés pour identifier sans ambiguïté certaines espèces de *Dalbergia* sont souvent observées en utilisant uniquement les clés d'identification basées sur les caractéristiques des feuilles, des fleurs et des fruits. Cette difficulté d'identification est aggravée par le chevauchement de ces caractères descriptifs et à l'apparition de taxons infra-spécifiques (Phillipson et Crameri 2018). Des recherches taxonomiques récentes (Phillipson et Crameri 2018) ont montré qu'une révision est de nouveau nécessaire parce qu'il existerait potentiellement 50 nouvelles espèces de *Dalbergia* à Madagascar (CITES, 2020). L'identification des espèces à partir de nouvelles méthodes comme l'anatomie du bois, la génétique et la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) est en cours aujourd'hui et leur combinaison sera étudiée. La mobilisation de ces méthodes d'identification constitue alors un intérêt crucial pour appuyer la taxonomique et apporter des arguments de classification. Cette étude a alors pour objectif d'utiliser l'approche SPIR pour classifier trois espèces de *Dalbergia* (*D. chlorocarpa* Bosser & R.Rabev., *D. greveana* Baill. et *D. neoperieri* Bosser & R.Rabev.) sur la base de leurs spectres d'absorbances PIR mesurés sur des microcarottes de bois (Fig. 1a), et en utilisant un spectromètre portatif VIAVI MicroNIR (Fig. 1b).

Matériels et méthodes

Un total de 34 microcarottes de bois appartenant à trois espèces de *Dalbergia* (*D. chlorocarpa*, *D. greveana* et *D. neoperieri*) a été collecté dans six régions géographiques, localisées dans la partie nord et ouest de Madagascar (Tab. 1). Les microcarottes ont été conditionnées à 12% d'humidité en utilisant une chambre climatique. Six spectres ont été mesurés aléatoirement sur la face LT ou LR de la partie duramen de chaque microcarotte de bois en utilisant un spectromètre VIAVI MicroNIR 1700 (gamme spectrale de 900 à 1700 nm, 125 longueurs d'onde). Ces espèces ont été choisies pour cette étude car elles ont une assez large aire de répartition (Tab. 1), des aires de distribution communes dans certaines régions de l'île, et des situations taxonomiques instables surtout pour *D. greveana* et *D. neoperieri*.



(a) (b)

Fig. 1 : Mesure de spectres d'absorbances sur des microcarottes de bois de Dalbergia (a) en utilisant un spectromètre MicroNIR VIAVI 1700 (b)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée sur les données spectrales prétraitées (combinaison d'une normalisation par la méthode "Standard Normal Variate" (SNV) et d'une dérivation première (Der1) suivie d'un lissage sur une fenêtre de 11 points des spectres par l'algorithme de Savitzki-Golay). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) basée sur la distance euclidienne et la méthode *"complete-linkage clustering*" a ensuite été réalisée à partir des coordonnés factorielles des spectres dans les deux premières composantes principales (CP). Le comportement des échantillons basé sur la gamme spectrale de 950 nm – 1650 nm a été évalué au moyen de la projection de leurs coordonnées factorielles dans le plan factoriel formé par les deux premières CP ainsi que l'homogénéité des classes pour chaque espèce dans le dendrogramme de classification issu de la CAH.

Tab. 1 : Nombre d'échantillons selon les espèces et les zones de collecte

Espèces	Régions de collecte					
	Sofia	Boeny	Betsiboka	Diana	Melaky	Menabe
D. chlorocarpa	1	8	2	1	0	0
D. greveana	3	0	3	6	0	0
D. neoperieri	0	0	1	0	4	5

Résultats et discussion

Plusieurs spectres des trois espèces de Dalbergia sont imbriqués entre eux dans le plan formé par les deux premières CP (CP1=78%, CP2=15%). Ceci pourrait expliquer que les trois espèces sont proches au niveau des caractéristiques chimiques de leurs bois. La variabilité spectrale intra espèce est observée pour les trois espèces, et qui diminue de manière décroissante pour *D. greveana*, *D. neoperieri* et *D. chlorocarpa* (Fig. 2). Ceci pourrait s'expliquer par la variabilité naturelle liée à la distribution géographique de l'espèce et qui influe la chimie de leurs bois (Sandak *et al*., 2011). Parmi les trois espèces, *D. greveana* et *D. neoperieri* dont les spectres sont beaucoup plus dispersés dans le plan CP1-CP2 (Fig. 2) sont également plus dispersés dans leurs zones de répartition.

Le dendrogramme de classification montre une classe plus homogène pour *D. chlorocarpa* que les deux autres espèces (Fig. 3). Les spectres de *D. chlorocarpa* de la région Diana semblent être plus éloigné que ceux de la région Boeny, Sofia et Betsiboka. Des sous-classes sont observées pour les deux autres espèces selon l'origine géographique. Les spectres de *D. greveana* de la région Sofia et Diana sont proches, mais se distinguent de ceux de la région Betsiboka. *D. greveana*_RIR3219 présente un spectre très différent de l'ensemble des spectres de *D. greveana*. Les études taxonomiques ont également affirmé que certaines espèces à large

distribution géographique comme *D. greveana* présentent des morphologies différentes selon leurs zones de distribution (Phillipson et Crameri, 2018).

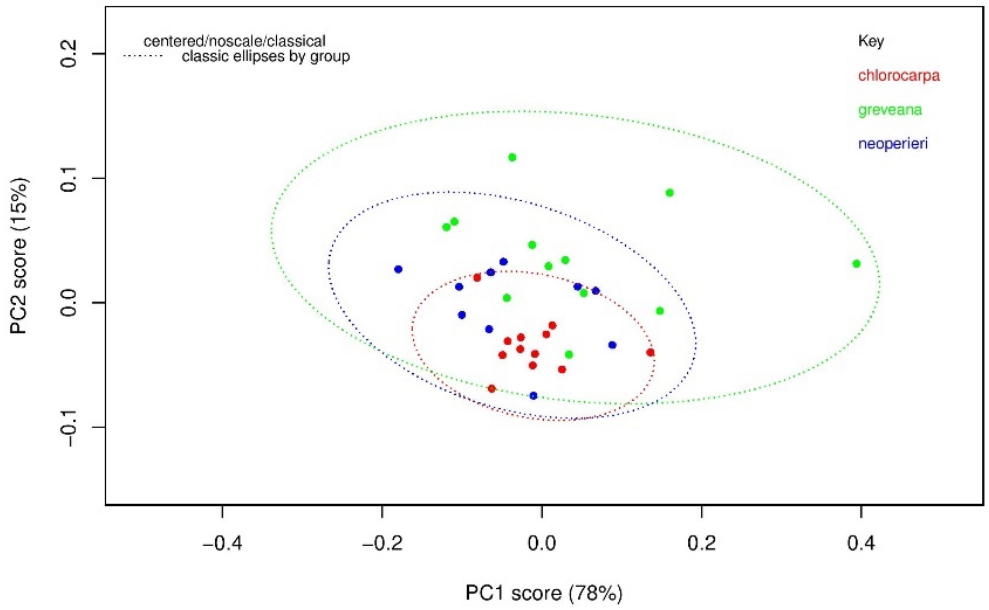


Fig. 2 : Carte factorielle formée par les deux premières CP issue de l'ACP effectuée sur les spectres prétraités avec SNV+Der1

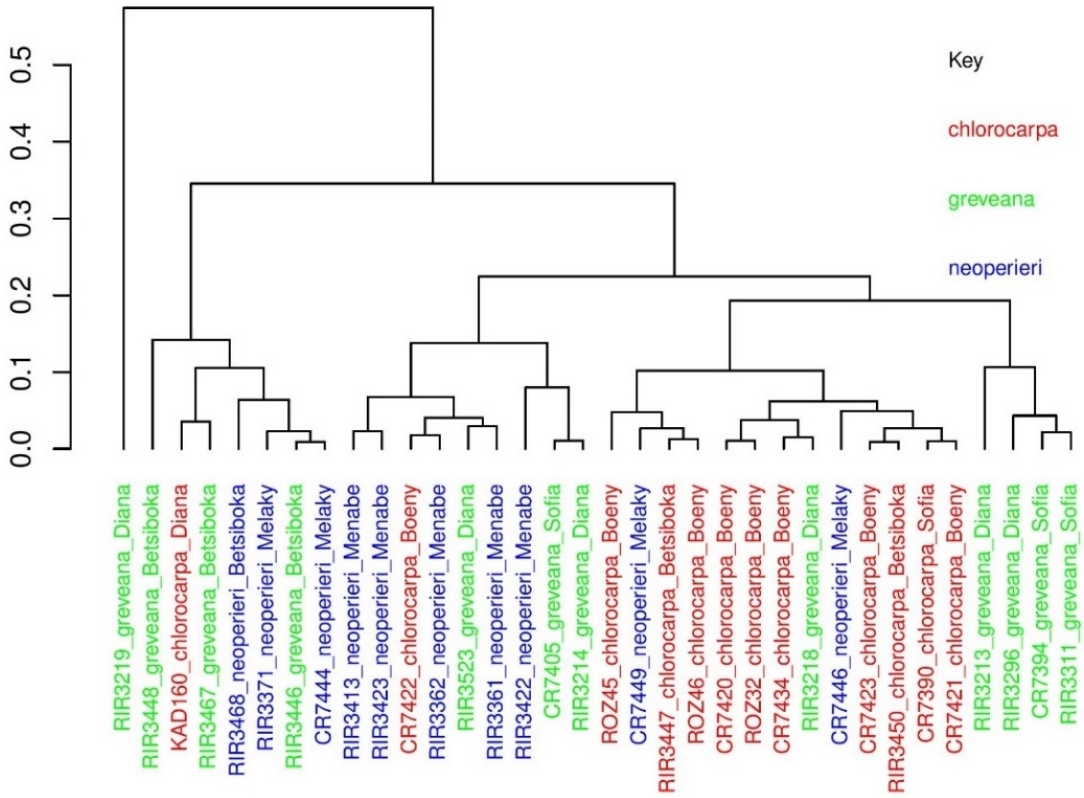


Fig.3 : Dendrogramme de classification basé sur la méthode complete-linkage clustering et la distance euclidienne calculée sur les données spectrales prétraitées avec SNV+Der1 (W=11 points)

Conclusions et perspectives

Les trois espèces de *Dalbergia* présentent des profils spectraux proches dans la région 950 nm-1650nm. *D. greveana* et *D. neoperieri* présentent une plus grande variabilité au niveau des spectres selon leurs zones de distribution. La cohérence des résultats de cette étude avec ceux de la systématique montre l'importance de l'utilisation d'autres approches comme la SPIR afin d'appuyer la systématique dans la révision taxonomique du genre *Dalbergia* de Madagascar. Des études approfondies devraient être menées sur les classes de *D. greveana* et *D. neoperieri* qui sont hétérogènes en rajoutant des échantillons supplémentaires. Les résultats devraient ensuite être confrontés avec ceux des méthodes moléculaires, anatomiques, et la taxonomie afin d'aboutir à des identifications plus robustes, surtout pour les échantillons dont les spectres ont présenté des caractéristiques différentes par rapport à l'ensemble des spectres de l'espèce en question.

Remerciements

Cette étude est financée par l'Union Européenne dans le cadre du projet G3D (Gestion Durable des Bois précieux *Dalbergia* et *Diospyros* de Madagascar). Les auteurs adressent leurs remerciements à l'équipe de l'UFR Sciences du Bois de l'ESSA-Forêts, l'équipe des anatomistes de la MBEV de la faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, et l'équipe des taxonomistes et botanistes de terrain de la MBG de Madagascar pour leurs contributions à cette étude.

Références

Bosser J., Rabevohitra R. (2005) Espèces nouvelles dans le genre *Dalbergia* (Fabaceae, Papilionoideae) à Madagascar, Adansonia 27 (2) : 209-216

Bosser J., Rabevohitra R. (1996) Taxa et noms nouveaux dans le genre *Dalbergia* (Papilionaceae) à Madagascar et aux Comores. Bull. Mus. Natl Hist. Nat., Paris, 4ème sér., sect. B, Adansonia 18 (3-4) :171-212.

CITES (2020), Interpretation and implementation matters general compliance and enforcement, Rapport of Madagascar on the implementation of decision 18.96. 25th meeting of the Plants Committee. Geneva (Switzerland), 17 and 20-23 July 2020.

Du Puy D.J., Labat J.-N., Rabevohitra R., Villiers J.-F., Bosseer J., Moat J. (2002) The leguminosae of Madagascar. Royal Botanical Gardens, Kew.

Phillipson P., Crameri S. (2018), Taxonomy of Dalbergia in Madagascar: a summary. Retrieved from: http://legacy.tropicos.org/projectwebportal.aspx?pagename=Dalbergia3&projectid=17

Saha S., Shilpi J.A., Mondal H., Hossain F., Anisuzzman Md., Hassan M.Md. Cordell G.A. (2013), Ethnomedicinal, phytochemical, andpharmacological profile of the genus Dalbergia L. (Fabaceae), Phytopharmacology, 4 (2), 291-346.

Sandak A., Sandak J., Negri M. (2011) Relationship between near-infared (NIR) spectra and the geographical provenance of timbre, Wood Science and Technology 45 : 35-48, DOI 10.1007/s00226-010-0313-y

La fluctuante stabilité de l'humidité des bois mis en œuvre en Guyane

LANDRY Léo[1], BEAUCHENE jacques[2]

[1] UTT, Université de Technologie de Troyes
[2] CIRAD, UMR Ecologie des Forêts de Guyane (EcoFoG), AgroParisTech, CNRS, INRAE
jacques.beauchene@cirad.fr

Mots clefs : bois tropicaux ; taux d'humidité ; mise en œuvre ; densité du bois ; climat tropical humide ; Guyane française

Contexte

Si l'humidité de stabilisation des bois mis en œuvre est un sujet récurrent dans l'utilisation des bois (Kollmann et Côté, 1984), il n'en demeure pas moins que peu d'études systématiques existent sur ce sujet de surcroit sur les bois tropicaux. La problématique d'humidité des bois lors de la mise en œuvre est plus souvent prédominante dans les préoccupations des bureaux de contrôle (Ingénéco, 2020). Des travaux récents sur la révision des humidités de service des éléments bâtis aux Antilles dans le cadre des Eurocodes (2005), (Manfoumbi Boussougou, 2012). Quistin et al (2019) montrent que le taux d'humidité estimé varie fortement d'une sous-région à une autre, ceci même sur des petits territoires comme ceux de la Guadeloupe ou de la Martinique. L'extension prochaine de cette étude, par les mêmes auteurs en Guyane, nous a donné l'occasion d'aborder à la fois des points de méthodologie sur la mesure d'humidité du bois mais surtout d'identifier les paramètres climatiques et biologiques responsables de la fluctuation de la stabilité du bois.

Objectif

L'objectif de l'étude était double : d'une part estimer les variations très locales du taux d'humidité des bois stabilisés mis en œuvre depuis des années, et d'autre part estimer les facteurs climatiques, physiques ou biologiques responsables de la stabilisation à court terme de fines planchettes de bois, afin d'identifier les variables les plus pertinentes influençant la stabilisation du bois.

Matériel et Méthode

Suivi de l'humidité de stabilisation par prélèvements dans le bâti existant. Afin d'estimer l'humidité au sein des éléments de construction bois en fonction de différentes variables (proximité avec le sol (hauteur), conditions microclimatiques (exposition au vent, zone de forêt ou zone urbaine)), nous avons prélevé des petites carottes en périphérie des éléments de structure (charpente, poteau) mis en œuvre depuis plus de 10 ans. Les prélèvements se font soit en sacrifiant l'élément, soit à l'aide d'un marteau sondeur, il permet d'extraire une petite carotte cylindrique de 4 mm de diamètre et de 2 à 12 mm de long. Ces prélèvements sont alors mis dans des tubes à fermeture hermétique en polypropylène (Eppendorfs), pesés, puis mis à l'étuve à 103°C jusqu'à la stabilisation de la masse des échantillons. La masse anhydre du bois permet de calculer l'humidité présente dans le bois au moment du prélèvement. Les espèces testées sont *Qualea rosea, Dicorynia guianensis, Goupia glabra, Handroanthus serratifolius, Vouacapoua americana*.

Influence des conditions climatiques sur la stabilisation sous abri du bois de diverses espèces. Pour estimer l'influence des facteurs climatiques sur la stabilisation du bois, nous avons réalisé

un suivi de la masse de planchettes de bois standardisées (L100 x 60 x 10 mm^3) provenant de doubles de la collection de la xylothèque de Kourou. Cette collection est d'origine guyanaise avec des échantillons provenant essentiellement de la bande littorale et de Saül. Nous avons sélectionné un groupe de 22 espèces de bois couvrant une plage de densité la plus large possible, ainsi que des essences assez riches en extractibles (Tab. 1). Les échantillons sont ensuite laissés dans un abri extérieur et sont pesés chaque semaine, afin de suivre l'évolution de leur masse. Parallèlement à cela et dans le même abri, est placé une petite station météorologique qui relève en temps réel les paramètres de température et d'humidité de l'air. A la fin du suivi, les planchettes ont été placées à l'étuve à 103°C jusqu'à la stabilisation de la masse des échantillons afin de pouvoir calculer leur humidité. La période suivie s'est faite sur 12 semaines du 15 février au 15 mai 2020 durant lesquelles se sont succédées saison sèche et saison des pluies.

Tab. 1 : Liste des espèces étudiées et densité des planchettes

Espèces	Densité à 12%	Espèces	Densité à 12%
Parkia ulei	0.31	Qualea rosea	0.72
Cocos nucifera	0.32	Dicorynia guianensis	0.79
Hevea brasiliensis	0.35	Goupia glabra	0.84
Ocotea guianensis	0.35	Peltogyne venosa	0.87
Cedrela odorata	0.35	Vouacapoua americana	0.92
Simarouba amara	0.41	Brosimum rubescens	1.03
Swietenia macrophylla	0.46	Swartzia panacoco	1.10
Bagassa guianensis	0.61	Dipteryx odorata	1.19
Aiouea guianensis	0.62	Micropholis obscura	1.25
Sextonia rubra	0.62	Brosimum guianense	1.26
Mangifera indica	0.65	Swartzia leblondii	1.30

Effets de la taille de l'échantillons sur les fluctuations d'humidité du bois. Des plaquettes d'essence et d'épaisseur différentes ont été débitées. Les espèces de bois retenues pour cette expérience sont *Peltogyne venosa, Simarouba amara et Vouacapoua americana. C*es trois essences ont été découpées en plaquettes de dimensions 130 L x 60 T mm, avec des épaisseurs R variant de 50, 20, 10, 5 et 2.6 mm. Les plaquettes ont été débitées en triple exemplaire afin de vérifier la répétabilité et ont été disposées dans l'abri météorologique fermé. Une pesée des plaquettes a été faite tous les deux jours pendant deux semaines, puis elles ont été séchées à l'étuve à 103°C jusqu'à stabilisation de leur masse afin d'en déterminer leur masse anhydre et par extension, leur humidité.

Résultats et discussion

Screening de l'humidité de stabilisation dans le bâti existant. La centaine de prélèvements au marteau sondeur que nous avons faits à différentes hauteurs en zone forestière à Paracou et en Zone urbaine à Kourou montrent une dispersion importante de l'humidité du bois des pièces mesurés (Fig.1) allant de 8% à 18,5%. Cette dispersion, parfois assez marquée en périphérie d'une même pièce de bois nous a incité à approfondir la distribution de l'humidité à l'intérieur de celle-ci. Ainsi, la Fig. 2 montre la répartition de l'humidité (mesurée tous les 5 mm à l'aide de prélèvements de 2 sections transversales à 0,10 m et 4,90 m du sol) d'un poteau d'Handroanthus *serratifolius* de 5 mètres de haut, 100 mm de large et 50 mm d'épaisseur. Nous pouvons alors constater un gradient d'humidité de plus de 3% entre la face exposée aux vents dominants et la face abritée.

Influence des conditions climatiques sur la stabilisation sous abri du bois de diverses espèces. Le suivi d'humidité des planchettes de 10 mm d'épaisseur a montré une très grande hétérogénéité entre les espèces, à la fois dans les valeurs atteintes, notons 12 % de différence pour les humidités max. entre le *S. amara* et *S. leblondii* (Fig. 3), que dans les amplitudes de variations, de plus de 11% à moins de 3% en fonction des espèces.

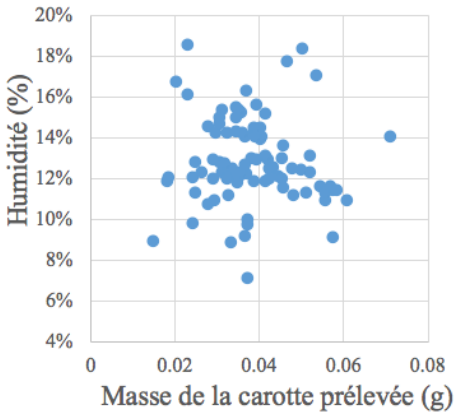


Fig. 1 : Humidité constatée en fonction de la masse anydre de la carotte

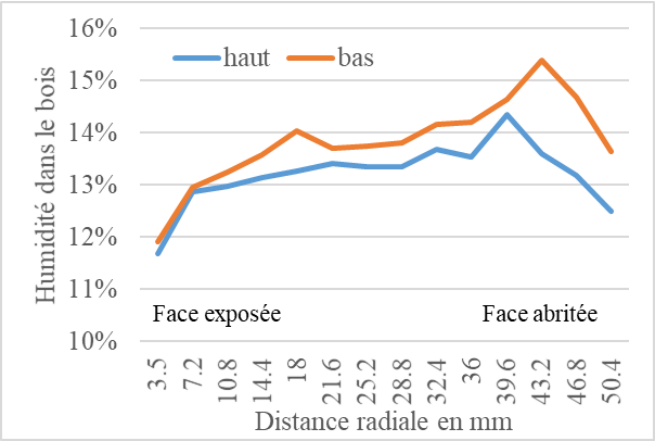


Fig. 2 : Répartition de l'humidité au sein d'un poteau d'ébène verte de 50 mm d'épaisseur (R) et 100 cm de largeur (T) à 0,10 m du sol (bas) et 4,90 m du sol (haut)

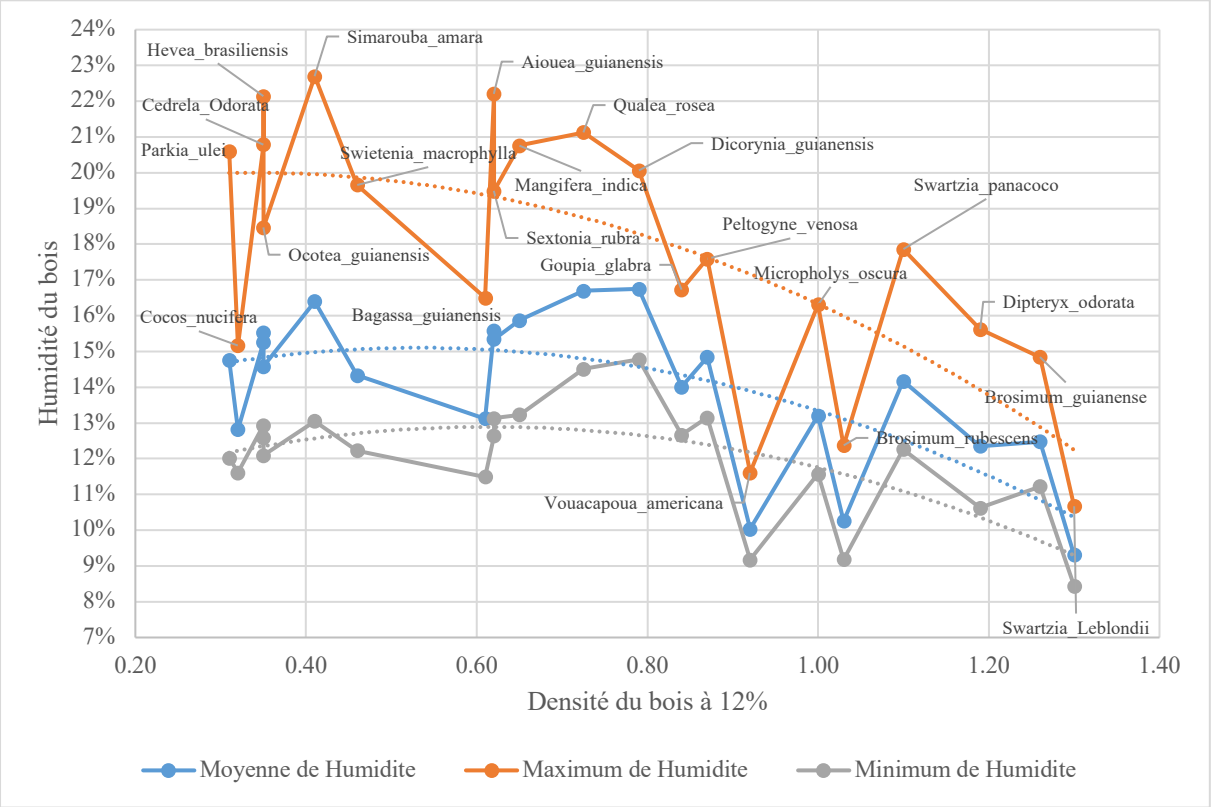


Fig. 3 : Evolution de l'humidité de 22 bois guyanais stoqués en extérieur à l'abri, sur une période de 12 semaines.

Ainsi, il est possible de distinguer des espèces très hygrophiles comme *H. brasiliensis, S. amara* ou *A. guianensis* et des espèces qui le sont très peu comme *V. americana, B. guianense, B. rubescens* ou *S. leblondii.* Si l'on cherche à expliquer l'origine de la variabilité de l'humidité de stabilisation à un instant t, on remarque que l'humidité atmosphérique explique 32.6% de la

variabilité, la densité du bois 15,6% et l'espèce de bois 28%. Les 3 variables ensembles expliquent 88% de la variabilité dans un modèle linéaire issu d'une ANAlyse de COVAriance. L'appartenance spécifique joue donc presque deux fois plus que la densité elle-même, il faut donc rechercher cette plus ou moins grande hygrophilie dans la composition et la quantité d'extractibles présents chez certaines de ces espèces, le *V. americana* en a plus de 20% par exempleCirad (1993). En remplaçant certains groupes hydroxyles, les extraits souvent hydrophobes limitent la capacité hydrophile de la matrice lignocellulosique.

Effets de la taille de l'échantillons sur les fluctuations d'humidité du bois. L'amplitude des variations d'humidité augmente fortement avec la diminution de l'épaisseur des plaquettes. Les plaquettes les plus épaisses ont une inertie importante, ce qui les rend relativement peu sensibles aux variations d'humidité. On retrouve toujours la grande stabilité du *V. americana* et les fortes variations du *S. amara* dont le bois est à la fois peu dense et peu chargé en extractibles.

Conclusion et perspectives

De multiples paramètres viennent influencer l'humidité intrinsèque d'un bois, créant ainsi un gradient complexe. La proximité avec le sol : le bas d'une poutre sera plus humide que le haut, mais également l'exposition : une face exposée au soleil et à l'air circulant sera plus sèche qu'une face abritée, une planche peu épaisse aura une humidité bien plus uniforme qu'une pièce plus massive. En ajoutant à cela le comportement propre de certaines essences, lié à leur composition chimique, on comprend alors que l'humidité est un paramètre multifactoriel, dépendant de facteurs parfois eux-mêmes corrélés. Certains bois ont une plus grande inertie face à ces variations, et sont donc plus stables, mais tous varient, à plus ou moins grande échelle. Un bois laissé en extérieur et soumis aux variations climatiques n'atteint donc jamais une humidité de stabilisation, il oscille plutôt autour d'une valeur moyenne, avec une amplitude propre à chaque espèce. Par ailleurs, il serait intéressant d'estimer les coefficients de diffusion longitudinaux et transversaux (Varnier 2019) pour certaines espèces utilisées dans la construction.

Remerciements :

Nous remercions Soepe KOESE pour le débit des éprouvettes.

Références

CIRAD (1993) Bois des DOM-TOM. 1, Guyane. Nogent-sur-Marne : CIRAD-CTFT, 231 p. ISBN 2-85411-008-0.

Eurocode 5 CEN TC 250 SC5, NF EN 1995-1-1 (2005), « Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments ».

Ingénéco (2020) Guide « Construction bois et gestion de l'humidité en phase chantier », Ingénéco, 104p.

Kollmann F.F.P., Côté W.A. (1984) Principles of wood science and technology. Vol. I : Solid wood. Spinger-Vergal, 1050 p.

Manfoumbi Boussougou N. (2012) Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement, thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

Quistin P., (2019) BOIS-DUR-AMHEN 971 et 972 Rapport Technique Investigations et Mesures, ANCO, 124p.

Varnier M., (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : Des sciences du bois à l'ingénierie, thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

Influence of natural potassium content on the thermal treatment of woody biomass

LOPES QUIRINO Rafael[1], COLIN Baptiste[1], LIN Yu-Ying[1], PETRISSANS Anélie[1], LECONTE François[1], CHEN Wei-Hsin[3], PETRISSANS Mathieu[1]

[1] Chemistry Department, Georgia Southern University, USA
[2] Université de Lorraine, Inra, LERMAB, F-88000 Epinal, France
[3] Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan, 701, Taiwan
rquirino@georgiasouthern.edu

Key words: biomass; catalyst; potassium, pyrolysis; thermal treatment; torrefaction

Context and objectives

In order to lower the environmental impact of human activities, there has been a growing need for the development of value-added products from biomass. One of the main issues for the industrial use of biomass is the lack of consistency of the feedstock, which normally leads to products with uneven properties (da Silva et al., 2018). Carefully controlled heat treatment methods have been developed to enhance some properties of biomass. In such methods, the biomass is heated in the absence of oxygen (torrefaction), resulting in materials that can be more easily processed into more homogeneous products (da Silva et al., 2018). The torrefaction of woody biomass has shown several benefits for the preparation of materials for energy applications (Keeratiisariyakul et al., 2019). Despite the advancements made to date, key mechanism steps of torrefaction and pyrolysis of biomass aren't fully understood. There is indication that metals and metalloids naturally present in ligno-cellulosic biomass can catalyze its thermal degradation (Hwang et al., 2013; Shoulaifar et al., 2016; Shen et al., 2020). The addition of potassium to biomass has been used as a means to improve the pyrolysis process (Hwang et al., 2013; Shen et al., 2020). The elucidation of the role of potassium during biomass thermal degradation enables the design of ideal heat treatment conditions for different biomass based on their natural potassium content. Tailored treatments to specific biomass resources ensure optimal and consistent properties of the final product, eradicating two of the major impediments for the widespread use of biomass at an industrial scale, which are their inherent variability and lack of consistent properties. It is widely accepted that a better control of time and temperature during biomass thermal treatment results in improvements in the quality, production cost, and environmental impact of the final products (Esteves and Pereira., 2009). Currently, the efficiency of biomass thermal treatment is compromised by a lack of fundamental knowledge of the chemical mechanisms involved in the process, including the role of potassium in these reactions. Treatment conditions are established, in most cases, by empiricism, often without taking into account initial wood properties, such as the natural potassium content. Tailored thermal treatment allows the strategic use of locally abundant, low cost biomass, adding value to natural resources for potential applications in energy, construction, and outdoor furniture.

To date, a number of studies have been published concerning the catalytic effects of impregnated potassium on thermal degradation of biomass. Natural potassium content still remains weakly known. In order to better understand the role of natural potassium during the thermal treatment of biomass, an unprecedented detailed investigation of the influence of

natural potassium content on the thermal treatment of different wood species has been carried out.

Material and methods

Thermogravimetric analysis was performed on two hardwood species (oak, *Quercus petraea* and beech, *Fagus sylvatica*) in inert (nitrogen) and oxidative (air) atmosphere: The natural potassium content of all species had been previously determined by ICP-AES. The thermodegradation behavior of all samples were analyzed by a thermogravimetric analyzer (TGA 2 (LF), Mettler Toledo). Prior to the experiments, the powdered woody samples were dried at 103 °C until mass stabilization. The samples were heated from 50 °C to 800 °C with a heating rate of 20 °C min^{-1}. The reaction gas flow was fixed at 100 mL min^{-1}.

Results and discussion

The latest results obtained indicate that potassium catalyzes the thermaloxidation of cellulose at higher temperatures (> 300˚C). This can be observed by a comparison of DTG curves of samples of the same wood species (oak) bearing different concentrations of natural potassium and treated under air (Fig. 1). An equivalent correlation was also established using beech under the same conditions, but was impossible to be established when the treatment was conducted under inert atmosphere. Along the same lines, it was shown that lower treatment times can be achieved for the isothermal torrefaction of beech at 300 ˚C under inert atmosphere with a higher natural potassium concentration (Fig. 2). Further investigations include a detailed analysis of a broader selection of wood samples impregnated with specific amounts of potassium to complement and validate the data generated so far. Additionally, the contribution of other metals will be considered and evaluated appropriately.

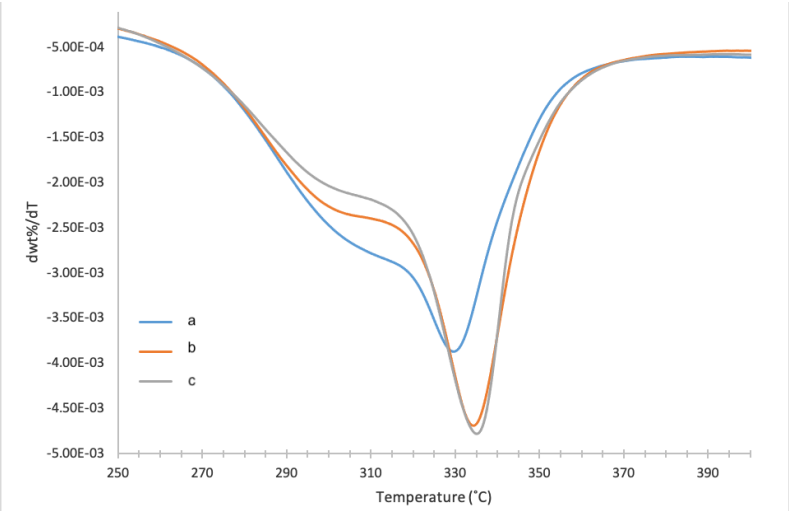


Fig. 1 : Derivative of thermogradation curves (DTG) of oak samples heated from 50 ˚C to 800 ˚C at 20 ˚C/min under air. The concentration of natural potassium in the samples is as follows: (a) [K] = 0.1657%, (b) [K] = 0.1039%, and (c) [K] = 0.0707%.

Conclusion remarks and perspectives

The results presented herein constitute an encouraging contribution towards a better understanding of the influence of natural mineral content in the thermal treatment of biomass. Elucidation of catalytic processes during biomass pyrolysis and/or torrefaction allows for better control of treatment duration, and quality and homogeneity of the product. Such control is achieved by:

- taking into account the natural potassium content of the wood biomass when determining treatment time;
- developing a selection method for the wood species with a high and consistent potassium content to decrease treatment time.

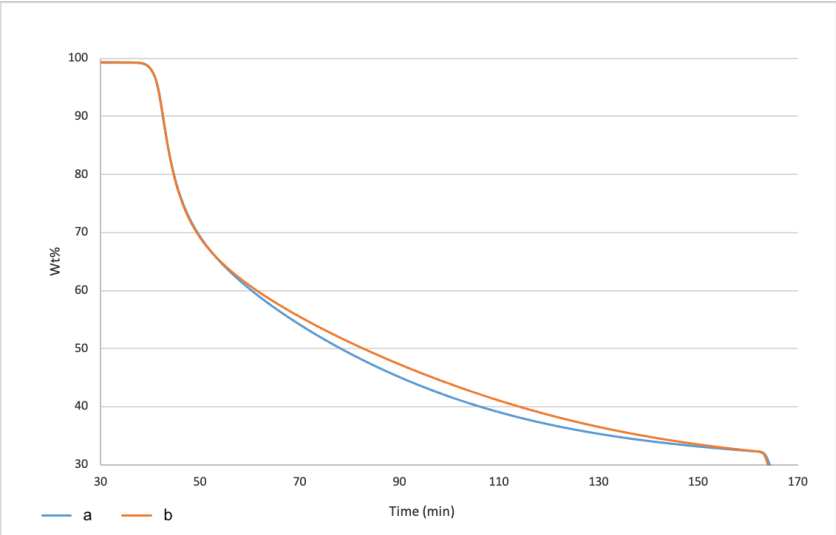


Fig. 2 : Thermogradation curves of beech samples treated at 300 ˚C under N2.
The concentration of natural potassium in the samples is as follows:
(a) [K] = 0.2047% and (b) [K] = 0.1274%.

Acknowledgements

This material is based upon research partially supported by the Thomas Jefferson Fund of the Embassy of France in the United States and the FACE Foundation. The authors would also like to thank Georgia Southern University and the University of Lorraine for financial support.

References

da Silva C.M.S., Carneiro A. de C.O., Vita, B.R., Figueiró C.G., Fialho L. de F., de Magalhães M.A., Carvalho A.G., Cândido W.L. (2018) Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 2426–2432. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.095

Keeratiisariyakul P., Rousset P., Pattiya A. (2019) Coupled effect of torrefaction and densification pre-treatment on biomass energetic and physical properties 10.

Hwang H., Oh S., Cho T.-S., Choi I.-G., Choi J.W. (2013) Fast pyrolysis of potassium impregnated poplar wood and characterization of its influence on the formation as well as properties of pyrolytic products. Bioresource Technology 150, 359–366. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.132.

Shoulaifar T.K., DeMartini N., Karlström O., Hupa M. (2016) Impact of Organically Bonded Potassium on Torrefaction: Part 1. Experimental. Fuel, 165, 544–552. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.024.

Shen Y., Zhang N., Zhang S. (2020) Catalytic Pyrolysis of Biomass with Potassium Compounds for Co-Production of High-Quality Biofuels and Porous Carbons. Energy, 190, 116431. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116431.

Esteves B.M., Pereira H.M. (2009) Wood Modification by Heat Treatment: A Review. Bioresources, 4(1), 370-404.

Session Posters C

Posters - Exposés flash / session C

Vendredi 20 novembre > 09:30-10:30

C01	**Influence of the heating rate in energy consumption of the biomass torrefaction process.** *Pétrissans Anélie, Lin Yu-Ying, Colin Baptiste, Leconte François, Lopes Quirino Rafael, Chen Wei-Hsin, Petrissans Mathieu*
C02	**Modélisation des déformations au séchage d'avivés de chêne à partir de la mesure de l'orientation des fibres.** *Besseau Benoît, Pot Guillaume, Girardon Stéphane, Collet Robert*
C03	**Evaluation des potentialités d'un spectromètre portable low cost NanoNIR comparé à un spectromètre micro NIR pour la discrimination de trois espèces de Dalbergia de Madagascar.** *Rasoamanana Patricia, Randriambinintsoa Tiavina, Chaix Gilles, Razafimahatratra Andriambelo Radonirina, Ramananantoandro Tahiana*
C04	**Fabrication de briquettes combustibles à base de la sciure du bois.** *Etsine Obame Jesse Alvin, Ekomy Ango Serge, Moutou Pitti Rostand, Mandatsy Moungomo Jean Brice*
C05	**Modélisation des contraintes longitudinales dans une section de branche : modèle élastoplastique.** *Van Rooij Arnoul, Gril Joseph, Almeras Tancrède, Badel Eric*
C06	**Approche fractionnaire de Zener du comportement différé de Millettia Laurentii (Wengue).** *Talla Pierre*
C07	**Vibrational measurement of shear modulus and damping of wood: An application of the Vybris-Torsion device.** *Hu Hsien-Tsung, Arnould Olivier, Carlier Capucine, Camp Gille, Lotte Sylvain, Langbour Patrick, Brémaud Iris*
C08	**Ouverture du Master Sciences du Bois à la rentrée 2021 à l'Université de Montpellier.** *Ciano Juliette, Burgers Agnès, Bardet Sandrine, Clair Bruno*
C09	**Simplified finite element model for natural frequencies estimation of CLT-concrete composite beams using notched connectors.** Thai Minh Van, Elachachi Sidi-Mohammed, Galimard Philippe, Ménard Sylvain
C10	**Mesure du fluage en cisaillement roulant dans la flèche des panneaux CLT.** *Allemand Charlotte, Lebee Arthur, Pinoteau Nicolas, Forêt Gilles*
C11	**Activité anti-termite de résidus d'hydrodistillation de trois plantes acclimatées au Burkina-Faso.** *Sankara Assétou, Ouedraogo Jean Claude Walter, Pignolet Luc, Thévenon Marie France, Bonzi-Coulibaly Yvonne*
C12	**Valorisation des co-produits du bois pour le collage des panneaux de bois.** *Rhazi Naima, Oumam Mina, Sesbou Abdessadek, Charrier Bertrand, Hannache Hassan, Charrier- Elbouhtoury Fatima*
C13	**Reproductibilité des projets architecturaux en bois local dans les territoires vosgiens : édifices exemplaires et modalités de reproduction de l'approvisionnement en bois et des procédés constructifs.** *Mazel Ivan*
C14	**Fluage des structures mixtes Applications aux ponts Bois / Béton colles.** *Quintero Christian, Sauvat Nicolas, Dubois Frédéric, Millen Anne*
C15	**Valorisation des extractibles présents dans les écorces d'essences du Nord-Est de la France.** *Fritsch Clément, Brennan Maree, Cosgun Sylvain, Dumarçay Stéphane, Colin Francis, Gérardin Philippe*
C16	**Comprendre les spécificités physiques et vibro-mécaniques des Palissandres, bois du genre pantropical menacé Dalbergia.** *Suarez Sebastian, Guibal Daniel, Cabrolier Pierre, Thévenon Marie France, Langbour Patrick, Brémaud Iris*
C17	**Etude exploratoire de brulage du bois : vers une industrialisation d'une technique traditionnelle.** *Leroyer Léo, Fleck Sébastien, Charrier Bertrand*
C18	**Thermal and Chemical Analysis of Sudanese Biomass for Energy and Materials Production.** *Wadah Mohammed, Cabaret Thomas, Osman Zeinab, Charrier Bertrand*

Influence of the heating rate on energy consumption of the biomass torrefaction process

PETRISSANS Anélie[1], LIN Yu-Ying[1], COLIN Baptiste[1], LECONTE François[1], LOPES QUIRINO Rafael[2], CHEN Wei-Hsin[3], PETRISSANS Mathieu[1]

[1] Université de Lorraine, Inra, LERMAB, F-88000 Epinal, France
[2] Chemistry Department, Georgia Southern University, USA
[3] Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan, 701, Taiwan

Anelie.Petrissans@univ-lorraine.fr

Keywords: Biomass; degradation pathway; energy consumption; heating rate; kinetics; torrefaction; sustainable material.

Context and objectives

Wood constitutes a renewable and sustainable material usable in construction, energy production or to provide chemical feedstock. However, raw wood utilization is limited because of its weak durability and dimensional stability, low energy density, high moisture content and compromised grindability. Wood torrefaction (temperature ranging between 200°C and 300°C in oxygen free atmosphere) is a thermal modification process with great ecological and economical importance to improve the shortcomings of the raw material (Esteves and Pereira 2009, Candelier et al. 2016, Chen et al. 2015, Kumar et al. 2017, Chen et al. 2018).

Many technologies for wood thermochemical modification have been developed in Europe and all over the world since the 1980's. In spite of the huge industrial development, torrefaction processes are led in an empirical manner (Bergman and Kiel 2005, Sun et al. 2011, Acharya et al. 2012). The interest of the scientific community has been triggered and numerous investigations have been developed to deeply understand the relationships between treatment intensity, reaction atmosphere, and final properties. A significant lack of knowledge persists in the initial stages of the process, where temperature is raised from the ambient to the treatment one (Fig. 1). Low heating rate (0.2 to 1°C.min^{-1}) is usually practiced when thermal treatment process is applied as preservation method improving dimensional stability and fungi resistance. A slow temperature increasing allows to avoid the appearance of crack, the alteration of mechanical properties and dimensional collapse. Even though this start-up phase is necessary, it induces longer time for the total process and immobilization of the production unit.

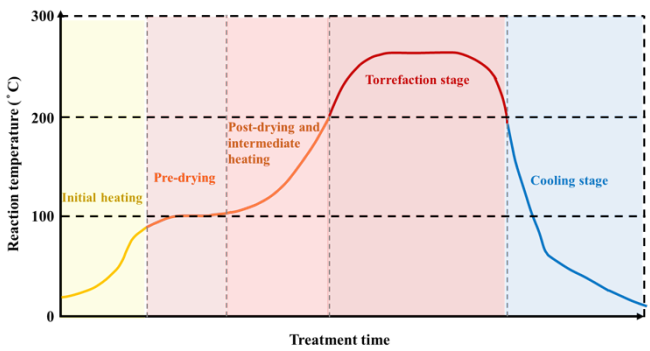


Fig. 1: Stages in the heating of most biomass.

On the other hand, when torrefaction process is used as pretreatment phase in energy production industry, heating rate is much higher (going from 20 to several hundred°C min^{-1}). Consequently, the total process is faster but requires the use of powerful heaters which can represent an important investment.

In order to elaborate an optimal business plan, companies need to evaluate the compromise between investment and process duration. For this reason, the investigation of the total energy consumption of the torrefaction process could be an important key for industrial process control.

Thus, the purpose of this study is to investigate the influence of the heating rate on the biomass thermo-degradation pathway and the final properties of the material.

Material and methods

Thus, experiments of thermal degradation were carried out on poplar (*Populus nigra*) woody powder by thermogravimetric analysis (TGA) with an analyzer TGA 2 (LF), Mettler Toledo. The heating rate has been varied between 0.2°C.min^{-1} and 20°C.min^{-1}. Prior to the experiments, the powdered woody samples were dried under 103°C in the oven for 24 h. The isothermal experimental plate is characterized by 5 hours duration under 220°C. In each run, around 25 mg of sample were loaded into an Al_2O_3 crucible (600 µL), and then the crucible was inserted into the TG furnace. The N_2 at a flow rate of 100 mL min^{-1} was used as the carrier gas to provide an inert atmosphere.

Results

Dynamic solid yield curves are shown on Fig. 2. A clear difference can be observed in the first stage of the torrefaction process when different heating rates are employed. At the end of the thermal treatment, this disparity starts to be less significant. Table 1 summarizes the occurred mass loss during the total heat treatment process composed by the heating stage (different heating rates) and a 5 hours isothermal plate. Mass loss is defined as follows:

$$Mass\ Loss\ (\%) = \frac{M_i - M_{treated}}{M_i} \times 100 \qquad (1)$$

Where M_i is the initial mass of the wood panel, $M_{treated}$ is the mass of the panel after the thermal treatement.

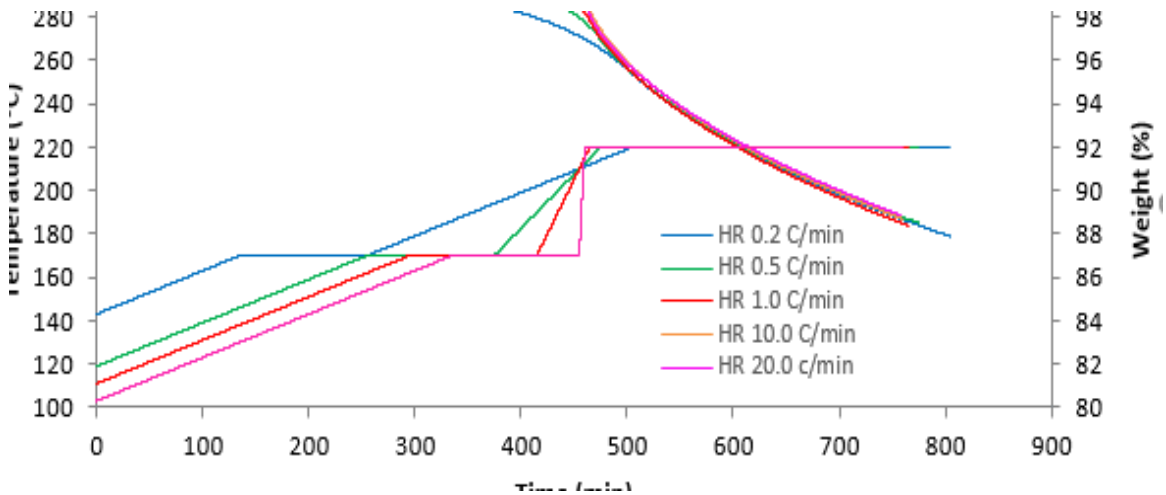


Fig. 2: Dynamic weight and temperature profiles for 6 different heating rates (0.2; 0.5; 1.0; 5.0; 10.0 and 20.0°C min^{-1}) followed by 5 hours isothermal plate.

Tab. 1: Mass loss (%) measured for the total torrefaction process.

Heating rate (°C/min)	0.2	0.5	1	5	10	20
Mass loss (%)	12.12	11.50	11.64	11.32	11.30	11.12

A deeper analysis of results has been proposed in order to investigate the influence of the heating rate on degradation pathway. For each heating rate, a new experiment has been performed. Thermal process starts with the studied heating rate. When solid yield reaches 98% (Fig. 3), the process is set to pyrolysis process till 800°C under 20°C min^{-1}.

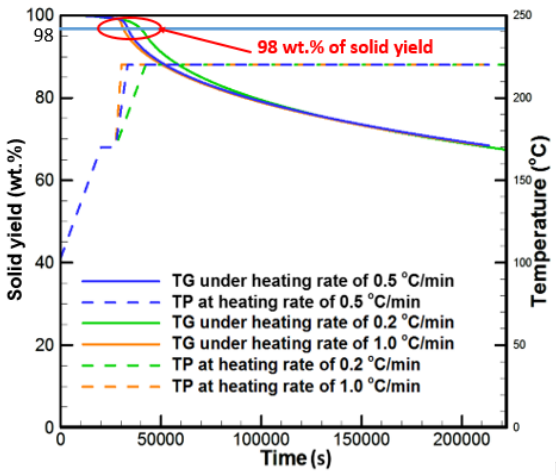


Fig. 3: Strategy of investigation of the influence of the heating rate on thermodegradation pathway.

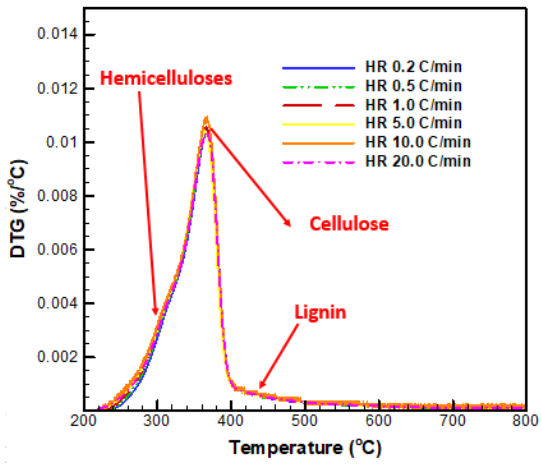


Fig. 4: Derivative thermodegradation analysis.

The derivative thermodegradation analysis (DTG) of pyrolysis are shown on Fig 4. This method is used as indirect way to determine the chemical composition of the biomass.

It can be seen on Fig.4 that for samples obtained after a low heating rate, the shoulder of hemicelluloses is less present. Hemicelluloses are more sensitive to the temperature. The time to reach the treatment temperature (220°C) is longer for low heating rate and this constituent is more degraded. The biomass chemical composition is significantly similar for cellulose and lignin.

Discussion

Chemical aspect: The DTG curves derived from pyrolysis of heat-treated products (2 % Mass Loss) overlap. It is indicating that the heating rate has no effect on the thermal degradation of the poplar when they achieve the same weight loss.

Energy aspect: Among cases with 2 % Mass Loss, using heating rate of 0.2°Cmin^{-1} is much energy-saving or cost-saving, since it can reach the 2 %Mass Loss at lower temperature. This may be due to the low heating rate having enough time to transfer heat homogeneously, and thus enhancing the thermal degradation.

Acknowledgements.

The authors gratefully acknowledge the financial support under the program ANR-11-LABEX-0002-01 (Lab of Excellence ARBRE) in France, Thomas Jefferson Fund of the Embassy of France in the United States and the FACE Foundation.

References

Acharya B., Sule I., Dutta A. (2012) A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing, Biomass Conv. Bioref., **2**, pp. 349–369.

Bergman P.C.A., Kiel J.H.A. (2005) Torrefaction for biomass upgrading, In: 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France 17-21 October.

Candelier K., Thévenon M.F., Pétrissans A., Dumarcay S., Gérardin P., Pétrissans M. (2016) Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. Ann. Forest Sci. 72, pp. 571-583.

Chen W.H., Peng J., Bi X.T. (2015) A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, pp. 847-866.

Chen W.H., Lin B.J., Colin B., Chang J.S., Pétrissans A., Bi X., Pétrissans M. (2018) Applied Energy, 231, 1, pp. 768-776.

Esteves B.M., Pereira H.M. (2009) Wood modification by heat treatment: a review. BioResources, 4, 1, pp. 370-404.

Kumar L., Koukoulas A.A., Mani S., Satyavolu J. (2017) Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review, Energy Fuels, 31, 1, pp. 37-54.

Sun Y.J., Jiang J.C., Zhao S.H., Hu Y.M., Zheng Z.F. (2011) Review of torrefaction reactor technology. Advanced Materials Research, 347-353, pp. 1149–55.

Modélisation des déformations au séchage d'avivés de chêne à partir de la mesure de l'orientation des fibres

BESSEAU Benoît, POT Guillaume, GIRARDON Stéphane, COLLET Robert

Arts et Metiers Institute of Technology, LABOMAP, HESAM Université,
F-71250 Cluny, France
benoit.besseau@ensam.eu

Mots clefs : séchage ; déformation ; orientation des fibres ; chêne.

Contexte et objectifs

Le bois a un comportement mécanique complexe lié à son comportement hygroscopique. L'humidité du bois (H%) se définit comme le rapport entre la masse d'eau présente dans une pièce de bois et la masse sèche de cette même pièce. Le séchage du bois peut se décomposer en deux phases principales. Dans un premier temps, c'est l'eau libre, présente dans les lumens des cellules et se déplaçant facilement dans le bois, qui s'évacue jusqu'à ce que le bois atteigne le point de saturation des fibres (PSF). Dans un second temps, l'eau liée, qui imprègne les parois cellulaires et dont la migration est lente, s'évacue à son tour en entrainant des retraits dimensionnels très hétérogènes. Ce phénomène génère des contraintes internes qui peuvent provoquer deux catégories de défauts liés au séchage : les fentes et les déformations. La variabilité des caractéristiques du matériau bois de l'échelle macroscopique à l'échelle anatomique rendent la modélisation du séchage très complexe. Les paramètres souvent mis en avant dans ce type de travaux de modélisation sont liés à l'hétérogénéité spatiale et l'anisotropie du matériau à différentes échelles. Les retraits tangentiels, radiaux et longitudinaux étant très différents, l'orientation des fibres par rapport à la direction longitudinale joue un rôle important. Mais face à la variabilité de toutes ces propriétés, elle est souvent considérée comme uniforme (Constant 1995), hypothèse souvent argumentée par la difficulté de modéliser les nœuds et la volonté de simplifier les problèmes de modélisation en n'étudiant que du bois sans défaut.

Or, les travaux récents traitant de la mesure locale de l'orientation des fibres ont montré tout l'intérêt de cette information dans la modélisation des propriétés mécaniques du bois (Viguier et al. 2015, Faydi 2017). De plus, ces mesures sont possibles sur bois vert, notamment dans le cas du chêne (Besseau et al. 2019).

L'objectif de cette étude est de prendre en compte la mesure de l'orientation des fibres pour modéliser les déformations au séchage d'avivés de chêne à l'aide d'un modèle éléments finis (EF).

Matériel et Méthode

L'échantillonnage est composé de 8 avivés de chêne frais de sciage de section 109 x 30 mm² issus de planches de découvert et de cœur de la production de la scierie Ducerf. Ces avivés sont répartis selon leur débit : 4 avivés débités sur dosse et 4 débités sur quartier. Dans les 3h suivant leur débit, les avivés ont été scannés une première fois au LaBoMaP dans un scanner CombiScan de Luxscan (groupe Weinig) afin de mesurer l'orientation des fibres. Ce scanner permet d'effectuer des mesures sur les deux faces d'un avivé en un seul passage. Les avivés ont ensuite été pré-séchés puis séchés jusqu'à une humidité de 10 % pour être à nouveau scannés dans le CombiScan afin de mesurer les déformations provoquées par le séchage.

Traitement des données

Le scanner permet d'obtenir différents points de mesure d'orientation des fibres le long de l'avivé avec une résolution de 1 mm dans le sens de défilement ($\vec{x}$) et de 4 mm dans le sens transverse ($\vec{y}$). Ces données sont interpolées sur une grille régulière de 1 x 1 mm² décrivant les faces supérieure et inférieure de l'avivé (Fig. 1b et 1c). Afin d'obtenir une représentation plane mono face de l'avivé, les mesures d'orientation des fibres des faces supérieure et inférieures ont été moyennées pour chaque pixel de la grille (Fig. 1d).

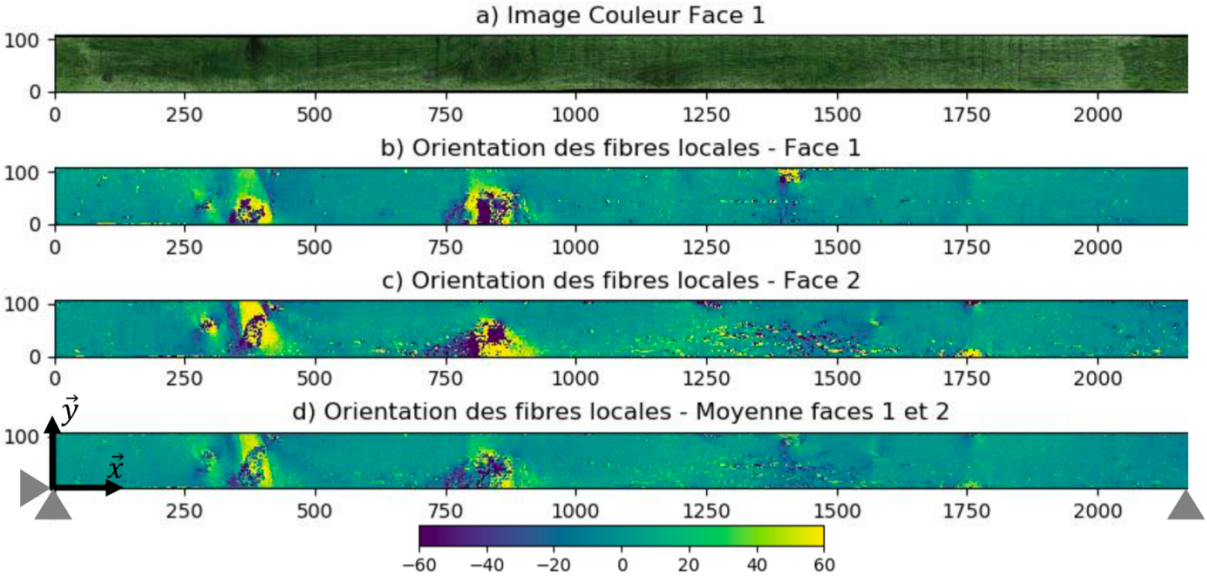


Fig. 1 : Avivé 1. Image couleur (a), grille des orientations des fibres des faces 1 (b) et 2 (c) et de leur représentation plane mono face (d).

Modèle éléments finis.

Un modèle EF plan a été mis en place sous Castem19 pour modéliser les déformations au séchage. Les éléments utilisés sont des quadrangles à 4 nœuds (QUA4) de 1 x 1 mm². Le maillage de l'avivé est régulier. Chaque élément est caractérisé par une orientation de fibres moyennée décrite ci-dessus, les propriétés matériau étant modifiées selon cet angle par rotation de la matrice de loi de comportement. Une loi de comportement isotrope transverse a été utilisée avec les paramètres donnés dans le Tab. 1. Les coefficients de retrait ont également été recalculés par rotation de la matrice en fonction de l'orientation des fibres élément par élément, sur la base des retraits donnés dans le Tab. 1 (Kretschmann 2010).

Tab. 1 : Propriétés mécaniques des avivés retenus dans le modèle EF.

Débit	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	μ_{LT}	R_L (%/H%)	R_T (%/H%)
Dosse (LT)	14.0	1.01	1.1	0.428	0.01	0.32
	E_L (GPa)	E_R (GPa)	G_{LR} (GPa)	μ_{LR}	R_L (%/H%)	R_R (%/H%)
Quartier (LR)	14.0	2.28	1.2	0.369	0.01	0.15

L'avivé est considéré comme étant sur deux appuis simples sur chaque extrémité inférieure (Fig. 1d). Les conditions aux limites sont les suivantes : l'appui gauche est bloqué en déplacement selon $\vec{x}$ et $\vec{y}$, et l'appui droit en $\vec{y}$. Le séchage est modélisé uniquement par la déformation élastique due aux retraits (qui varient, pour rappel, en fonction de l'angle qui leur

est associé). Une variation de l'humidité du bois de 21 % a été appliquée, ce qui correspond typiquement dans la réalité à une variation de teneur en eau lors du séchage de 31 % (PSF) à 10 %. L'application de ce retrait en fonction de l'angle qui diffère d'un élément à l'autre crée des contraintes internes qui se traduisent ensuite par des déplacements. Après une résolution linéaire, la position finale des bords donne la déformation globale de l'avivé suite aux retraits, modélisant ainsi les déformations de séchage dans le plan, c'est-à-dire le voilement longitudinal de rive au sens de l'ISO 2300:1973 (fr). Le modèle est ici élastique, linéaire et ne prend pas en compte la cinétique de séchage.

Résultats et Discussions

Déformée

La Fig. 2 donne un exemple de déformation prédite par le modèle EF en comparaison avec la déformation réelle mesurée. La déformée globale apparait proche de la déformée réelle.

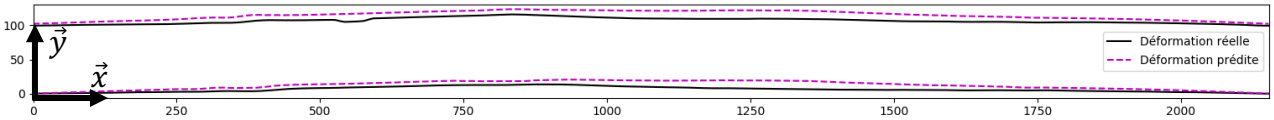


Fig. 2 : Avivé 1. Déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).

Corrélation entre les flèches prédites et mesurées

La flèche réelle $f_r(x)$ est définie comme la moyenne des flèches relatives $f_{r,1}(x)$ et $f_{r,2}(x)$ des bords $b_{r,1}(x)$ et $b_{r,2}(x)$. Ces flèches représentent respectivement la distance aux droites $\Delta_{r,1}$ et $\Delta_{r,2}$, (Fig. 3) reliant les deux extrémités de chaque bord. La flèche prédite $f_p(x)$ le long de l'avivé est définie de la même manière à partir des bords déformés du modèle EF.

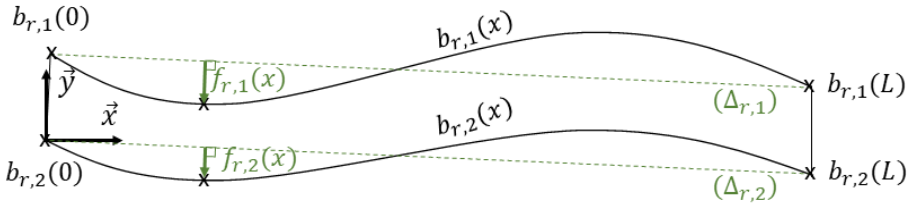


Fig. 3 : Calcul des flèches sur chant d'un avivé déformé.

Ainsi, pour les deux groupes d'avivés, $f_r(x)$ est tracée en fonction de $f_p(x)$ sous forme d'un nuage de points donné sur les Fig. 4a et 4b. Le coefficient de corrélation R² et le RMSE (eq. 1) sont de 0.92 et 2.6 mm pour les avivés débités sur dosse, et respectivement de 0.79 et 1.9 mm pour ceux débités sur quartier. Pour les flèches maximales, notées $f_{r\,max}$ et $f_{p\,max}$ (Fig. 4c), le R² est de 0.78 avec un RMSE de 2.6 mm.

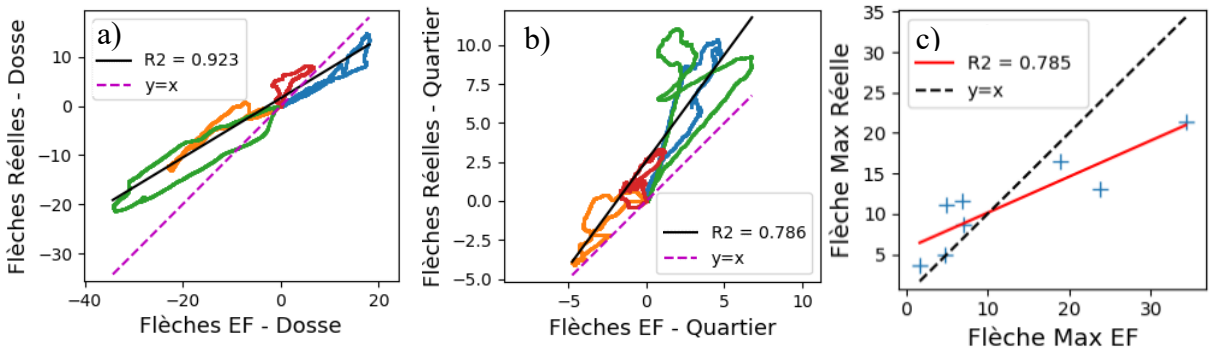


Fig. 4 : Comparaison entre mesures réelles et simulations. Les flèches sont données en mm.
A Gauche : avivés débités sur dosse. Au centre : avivés débités sur quartiers.
A droite : Corrélation entre flèches max, dosses et quartiers confondus.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{x=1}^{N}\left(f_p(x) - f_r(x)\right)^2} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Ces résultats permettent de valider l'utilisation d'un modèle EF pour déterminer les déformations au séchage d'un avivé noueux. Ils confirment l'influence et l'importance de la prise en compte de l'orientation des fibres dans les déformations au séchage. Dans le contexte industriel où des bois déformés peuvent bloquer des machines ou générer des défauts d'usinage, ce sont les flèches maximales qui retiennent plus l'attention afin d'apprécier l'amplitude des déformations. Si la corrélation entre les $f_{r\ max}$ et $f_{p\ max}$ est plutôt bonne, des différences locales de flèches jusqu'à 15 mm ont été relevées sur certains avivés.

Conclusions et perspectives

Ces premiers résultats de modélisation du voilement longitudinal de rive à partir de la mesure de l'orientation des fibres sur bois vert sont encourageants. Il semble donc possible de modéliser convenablement les déformations au séchage dans le plan d'un avivé de chêne uniquement à partir des mesures d'orientation des fibres, générant des variations locales de retrait au sein de l'avivé. Néanmoins, l'hétérogénéité des retraits locaux trouve aussi une cause dans la composition même du bois, indépendamment de l'orientation des fibres. Par exemple, le bois de tension et le bois de réaction jouent un rôle non négligeable dans les déformations de séchage, tout comme la cinétique de séchage. Afin d'améliorer ce modèle EF, les valeurs de retrait propre à chaque avivé pourront être appliquées, prenant ainsi en compte le fait que les avivés ne sont jamais débités parfaitement dans le plan LT ou LR. Une évolution du modèle EF prenant en compte les deux faces séparément est aussi envisagée.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Bourgogne-Franche-Comté, Xyloforest et le groupe Ducerf pour leur soutien financier, technique et humain dans ce projet.

Références

Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J (2019) Measurement of Fiber Orientation by Laser Light Scattering on Dry and Rough Sawn Green Hardwoods. In 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium 225–232 (Wang, Xiping; Sauter, Udo H.; Ross, Robert J., eds).

Constant T. (1995) Modélisation des déformations des pièces de bois au séchage et influence de la structure interne de l'arbre. Rev. For. Fr. 141 doi:10.4267/2042/26705.

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

Kretschmann D. E. (2010) Wood handbook, chapter 05: mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA

Viguier J, Jehl A, Collet R, Bleron L, Meriaudeau F (2015) Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling. Wood Mat Sci Eng. 10: 145-156. https://doi.org/10.1080/17480272.2014.951071.

Evaluation des potentialités d'un spectromètre portable low cost NanoNIR comparé à un spectromètre micro NIR pour la discrimination de trois espèces de *Dalbergia* de Madagascar

RASOAMANANA Lalaina Patricia[1], RANDRIAMBININTSOA Tiavina[1], CHAIX Gilles[2,3], RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina[1], RAMANANANTOANDRO Tahiana[1]

[1]Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Antananarivo 101, Madagascar
[2]CIRAD - UMR AGAP, Montpellier, France
[3]AGAP, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Institut Agro, Montpellier, France
patriciarasoamanana@gmail.com

Mots clefs : *Dalbergia* ; Spectrométrie Proche InfraRouge ; Nanospectromètre ; MicroNir ; PLSDA

Contexte et objectif

Les bois précieux de Madagascar appartiennent aux genres *Dalbergi*a (Fabaceae) et *Diospyros* (Ebenaceae). Ils constituent une catégorie de produits ligneux commercialisés et sont « très appréciés en raison de diverses qualités intrinsèques intéressantes. La combinaison de qualités intrinsèques et de la rareté entraîne généralement des prix de vente plus élevés que pour les autres catégories ou types de bois. » (Jenkins et al. 2012). Au cours des 20 dernières années, l'exploitation illégale des bois précieux est devenue un problème récurrent à Madagascar, menaçant gravement ses écosystèmes et sa biodiversité exceptionnelle. Afin d'assurer la gestion durable de ces ressources le genre *Dalbergia* et *Diospyros* de Madagascar ont été inscrits dans l'annexe II de la CITES en 2016. Malheureusement, ces balises réglementaires n'arrivent pas à endiguer l'exploitation illicite de ces ressources. L'identification des espèces constitue un des points clés dans la gestion de ces espèces précieuses mais les capacités sont limitées. Plusieurs méthodes d'identification ont été développés au cours des dernières années dont la Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) (Tsuchikawa et al. 2003, Tsuchikawa et Kobori 2015, Snel et al. 2018).

La SPIR rentre dans la catégorie de la spectroscopie vibrationnelle. Elle a été reconnue comme une des méthodes non destructives performantes pour l'évaluation des propriétés du bois et la discrimination d'espèces (Tsuchikawa et al. 2003, Tsuchikawa et Kobori 2015). Par rapport aux méthodes de mesure utilisées en laboratoire, comme les mesures de densité et l'analyse microscopique nécessitant de détruire les échantillons, elle permet une analyse rapide et multiple, à faible coût, et ne nécessite pas de grande préparation des échantillons, après l'élaboration d'un modèle basé sur un étalonnage. Il existe différents modèles de spectromètre proche infrarouge (PIR), caractérisés par des gammes et résolutions spectrales de tailles différentes. Les spectromètres de laboratoires comme le Bruker MPA couvrent la totalité de la région PIR et la résolution est élevée, mais ils ne sont pas transportables sur le terrain. Les spectromètres portatifs présentent des caractéristiques techniques moins performantes, mais ils sont bien adaptés pour des usages de terrain dans le cadre de la gestion des ressources naturelles. Le laboratoire sciences du bois de l'ESSA-Forêts dispose d'un spectromètre portatif VIAVI MicroNIR 1700, qui a donné des résultats satisfaisants en matière de discrimination d'espèces. Afin de faciliter la généralisation de la méthode, le laboratoire teste un nouveau matériel moins onéreux qui pourrait être distribué dans toutes les directions régionales de l'administration forestière et les agents de contrôle. Cette étude a alors pour objectif de comparer la potentialité

d'un NIRscan Nano Texas Instrument (Dallas TX, USA) par rapport au VIAVI MicroNIR 1700 (JDSU, Santa Rosa, CA, USA) pour discriminer trois espèces de *Dalbergia* de Madagascar : *D. chlorocarpa* Bosser & R.Rabev*, D. orientalis* Bosser & R.Rabev. et *D. purpurascens* Baill..

Matériels et méthodes

L'étude repose sur 59 échantillons de microcarottes de bois de 5 mm de diamètre appartenant à trois espèces de *Dalbergia : D. chlorocarpa, D. orientalis et D. purpurascens* (Tab. 1). Le choix de 3 ces espèces se justifie par leur appartenance aux espèces de grands arbres qui présentent un intérêt commercial.

Tab. 1 : Nombre et répartition des échantillons selon les espèces

Espèces	Nombre d'échantillons	Lot d'étalonnage	Lot de validation
D. chlorocarpa	8	6	2
D. orientalis	23	17	6
D. purpurascens	28	14	4

Les carottes de bois ont été stabilisées dans une enceinte climatique (65% HR, 20°C) pour obtenir une humidité de 12%. Sur chaque échantillon ainsi stabilisé sans autre préparation, 4 à 5 spectres ont été mesurés sur le duramen, avec le MicroNIR puis avec le NIRscan Nano (Tab. 2). Les spectres obtenus avec les 2 matériels ont été prétraités avec le logiciel Chemflow en utilisant trois pré-traitements différents : Standard Normal Variate, Detrend, Dérivation et Lissage de Savitzki Golay. Deux modèles de discrimination ont été établis respectivement sur les spectres mesurés à partir du NIRscan Nano (PLSDA_NIRscan Nano) et MicroNIR (PLSDA_MicroNIR) en utilisant l'analyse discriminante par moindre carrées partiels (PLSDA). Trois quart des échantillons (47) a été utilisé pour l'étalonnage. Chaque modèle a ensuite été testé sur le quart d'échantillons restant (12). Les performances des modèles ont été comparées au moyen des pourcentages d'erreur de classification en validation indépendante.

Tab. 2 : Caractéristiques techniques des deux spectromètres

Spectromètre	Région spectrale (nm)	Résolution (nm)	Prix (USD)
VIAVI MicroNIR 1700	908 – 1676	6,19	20000
NIRscan Nano	900 -1700	3,93	1000

Résultats et discussions

La dérivation seconde de Savitzki-Golay constitue le meilleur prétraitement qui a permis d'aboutir à des erreurs de classifications minimales pour les deux modèles PLSDA (Tab. 3). Le modèle PLSDA_NIRscan Nano présente un pourcentage d'erreur de classification en validation indépendante deux fois moins élevé par rapport au modèle PLSDA_MicroNIR. La différence de performance des deux spectromètres semble être surestimée sur la base des erreurs de classification en validation indépendante car la taille du lot de validation est faible. Mais en se basant sur le nombre de spectres bien classés en validation indépendante, on peut dire que les deux spectromètres présentent des performances proches. En effet, 11 sur 12 individus sont bien classés par le modèle PLSDA_NanoNIR, contre 10 individus pour le modèle PLSDA_MicroNIR (Tab. 4). Par rapport au NanoNIR, la largeur de la fenêtre de mesure du MicroNIR est plus grande que le diamètre des échantillons de microcarottes, ce qui pourrait avoir laissé davantage d'éventuelles grandeurs d'influences externes à déformer les spectres, à l'exemple des fuites de rayonnements PIR et l'enregistrement des lumières parasites par le capteur du spectromètre. La résolution du spectromètre qui est bien plus élevée pour le

NanoNIR par rapport au MicroNIR pourrait également contribuer dans l'apport davantage d'informations chimiques dans les spectres mesurés sur le NanoNIR que ceux des spectres prises avec le MicroNIR. Les modèles PLSDA aurait été influencés par l'effet de ces grandeurs.

Pour les deux modèles PLSDA, l'erreur de classification qui est encore assez élevé pourrait être liée à l'existence d'espèces dont les caractéristiques chimiques sont très proches, ou à l'incertitude des données de références sur les noms des espèces.

Tab. 3: Performance des deux modèles PLSDA

Espèces	Modèles	Prétraitements	Nombre de VDs	$\%E_{vc}$	$\%E_p$
D. chlorocarpa D. purpurascens D. orientalis	PLSDA (NanoNIR)	Der2 (W= 9 points)	8	31,4	8,3
	PLSDA (MicroNIR 1700)	Der1 (W=5 points)	2	40.0	16,7

E_{vc} : Erreur de classification en validation croisée
E_p : Erreur de classification en validation indépendante
VDs : variables discriminantes

Tab. 4: Matrice de confusion en validation indépendante

		Classes de références (PLSDA_NIRscan Nano)				
		chlorocarpa	*orientalis*	*purpurascens*	Nombre d'individus bien classés	Nombre d'individus mal classés
Classes prédites	*chlorocarpa*	2	0	0	2	0
	orientalis	0	6	2	6	0
	purpurascens	0	0	2	2	2
% bien classés		100	100	50	83,3% (10/12)	
% erreur de classification		0	0	50		16,7% (2/12)

		Classes de références (PLSDA_MicroNIR)				
		chlorocarpa	*orientalis*	*purpurascens*	Nombre d'individus bien classés	Nombre d'individus mal classés
Classes prédites	*chlorocarpa*	2	0	0	2	0
	orientalis	0	6	1	6	0
	purpurascens	0	0	3	3	1
% bien classés		100	100	75	91,7% (11/12)	
% erreur de classification		0	0	25		8,3% (1/12)

Conclusions et perspectives

Les résultats de cette étude montrent que les deux spectromètres ont des performances proches. Le coût d'acquisition du matériel est pourtant plus accessible pour le NanoNIR que celui du MicroNIR 1700. Ce qui rend le NanoNIR plus adapté pour les pays en développement comme Madagascar, en tant qu'outil d'aide dans la gestion des ressources en bois précieux. Néanmoins, les erreurs de classifications pour les deux modèles sont encore assez élevées. Plusieurs

optimisations sont encore nécessaires afin d'utiliser l'outil et le modèle dans la gestion des ressources en bois précieux de Madagascar, notamment en terme d'enrichissement des échantillons d'étalonnage des modèles, la vérification des noms scientifiques attribués à chaque échantillon, la sélection des variables pour le traitement des données, et la combinaison d'autres prétraitements.

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements aux 3 équipes de recherche au sein desquelles se déroulent cette présente thèse : - Laboratoire des Sciences du bois (Département des Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar), - Laboratoire d'anatomie, de dendrochronologie et d'identification des bois ou LAIM (Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiroz », Université de São-Paulo, Piracicaba, Brésil) - Plateforme d'histocytologie et d'imagerie cellulaire végétale (UMR Agap et BPMP), Montpellier, France. La thèse est financée par le WRI (World Resources Institute) et par l'OWSD (Organization for Women in Science for the Developing World).

Références

Jenkins et al. 2012

Shah A., Rahim S., Bhatti K.H., Khan A., Din N., Imran M., Iqbal J. (2015) Ethnobotanical study and conservation status of trees in the district Sargodha, Punjab, Pakistan. ΦYTON, 84, 34-44.

Snel, F.A., Braga J.W.B., Silva D., Wiedenhoeft A.C., Costa A., Soares R., Coradin V.T.R., Pastore T.C.M. (2018) Potential field-deployable NIRS identification of seven Dalbergia species listed by CITES. Wood Science and Technology, doi: 10.1007/s00226-018-1027-9

Tsuchikawa S, Inoue K, Noma J., Hayashi. K. (2003) Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination, Journal of wood science, 49: 29-35

Tsuchikawa S., Kobori H. (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology, Journal of Wood Science and Technology, 61:213-220

Fabrication de briquette combustible à base de la sciure du bois

ETSINE OBAME Jesse alvin[1], EKOMY ANGO Serge[2], MOUTOU PITTI Rostand[2,3], MANDATSY MOUNGOMO Jean Brice[4]

[1]Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF), LaReVaBois, Libreville, Gabon
[2]CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, Gabon
[3]Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, 63000 Clermont Ferrand, France
[4]Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Libreville, Gabon

Mots clefs : briquette, combustible, déforestation, sciure de bois, papier, valorisation

Contexte et objectifs

Le bois de chauffe et le charbon de bois font partie des sources d'énergies très utilisées au Gabon pour les cuissons alimentaires familiales, les activités commerciales culinaire et le chauffage lors des nuits froides. Ces deux sources s'utilisent de plus en plus en ville compte-tenu de la difficulté d'avoir accès aux autres sources d'énergies. Ils sont un des facteurs de la déforestation et entrainent aussi des problèmes de santé en raison des longues distances nécessaires à la récolte. Afin de contribuer à la valorisation des déchets de bois issus de la transformation du bois dans les scieries au Gabon et de la réduction des pressions sur la forêt, cette étude se propose d'étudier le mélange des connexes de l'okoumé et les déchets de la papeterie notamment le carton ondulé pour fabriquer des briquettes compressées qui devront permettre la fabrication de briquettes compressées par la méthode de densification (compression des matières qui produit un échauffement suffisant pour induire des phénomènes physicochimiques provoquant une plastification de la lignine) et du charbon.

Des analyses physico-énergétiques ainsi que les tests comparés de combustion ont été réalisés afin d'optimiser la qualité des briquettes obtenues.

Matériel et méthode

Après avoir récupéré les connexes auprès des scieries et le carton ondulé dans les papeteries, les sciures ont été séchées à 15 %. Afin d'avoir la bonne granulométrie de la sciure, tous les connexes ont été tamisés.

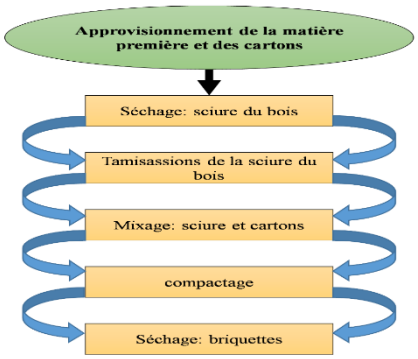


Fig. 1 : Processus de fabrication des briquettes

Fig. 2 : Echantillons de briquettes

Ensuite cette sciure tamisée et le carton préalablement déchiqueté ont été mélangés. De l'eau a été ajoutée (2 litres) pour avoir une bonne homogénéisation du produit final. Pour tous les échantillons le même volume a été utilisé ainsi qu'une pression de 5 Nm.

A l'aide du logiciel Mini lab, dix différentes quantités de mélanges connexes+papier ont été obtenues. Pour avoir les échantillons finaux, ces derniers ont été compactés dans un dispositif mis en place (Fig. 1 et 2).

Résultats et discussion

A l'aide du logiciel statistique STATGRAPHICS et l'analyse de variance (ANOVA) nous avons effectué différents tests de nos échantillons.

Tests d'humidité

Nous avons testé la capacité des différents échantillons à absorber de l'eau avant de s'effriter en fonction de la norme ISO 17225-3:2014 qui indique qu'une briquette doit avoir TH > 15%.

Il en ressort que ce sont ceux qui ont plus de sciure qui ont un taux d'humidité important.

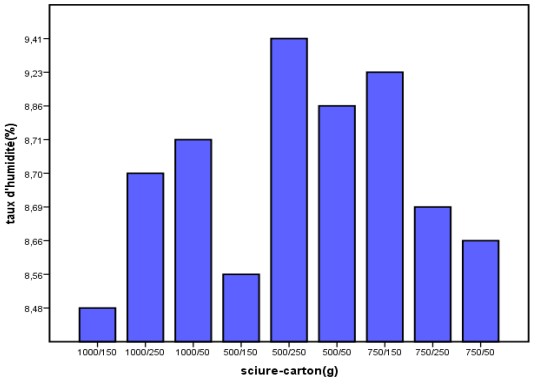


Fig. 3 : Humidité des échantillons

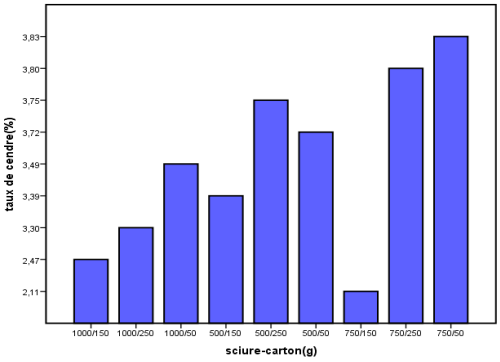


Fig. 4 : Taux de cendre des échantillons

Tests de densité

Ces tests nous ont permis de vérifier que la densité apparente des briquettes variait entre 0,24 g/cm^3 et 0,28 g/cm^3. La briquette constituée de 1000g de sciure et 250g de carton avait la densité la plus élevée (0,28g/cm^3), tandis que la briquette produite avec 750g de sciure et 50g de carton de particules (0,46 g/cm^3) avait la plus faible densité.

Taux de cendre

Le taux de cendres est la quantité des matières minérales contenues dans un combustible. L'évaluation de la teneur en cendre s'est faite par la sélection d'un échantillon qui a été pesé puis consumé à l'air libre complètement, avec la récupération et pesée des cendres.

Il est important pour l'appréciabilité du combustible du fait que quand il est très élevé, ces cendres deviennent un obstacle à la progression de la combustion. Il est compris entre 2.11% et 3.83% par rapport aux différentes compositions. La teneur minimale en cendres recommandée par DIN 51731 est de 0,7%, ce qui est bien inférieure à la fourchette obtenue dans cette étude.

Le pouvoir calorique

Le pouvoir calorique représente la quantité d'énergie contenue dans la briquette combustible, il est mesuré expérimentalement par le processus du transfert thermique.

Le pouvoir calorifique de la briquette est un paramètre important pour la combustion du combustible. Il permet d'évaluer l'énergie dégagée par la briquette. Pour cette étude, il est compris entre 14.06 MJ/kg et 19.15 MJ/kg. D'après la norme en vigueur pour briquettes ISO 17225-3:2014 pour les briquettes (Forêt, plantations et autre bois vierge, sous-produits et déchets de l'industrie du traitement du bois, et bois usagé sans traitement chimique) leur pouvoir calorifique doit être supérieur ou égal à 14,9 MJ/Kg.

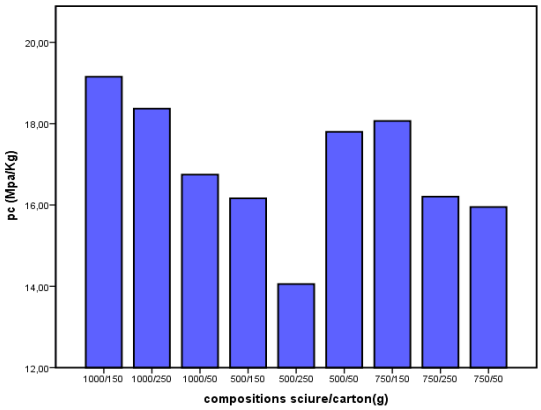


Fig. 5 : Pouvoir calorifique des échantillons

Tests de combustion

Ils avaient pour but de voir la durée de combustion et l'évolution de la température de chaque type d'échantillon ainsi que les connexes de l'okoumé. La Fig. 6 montre les résultats obtenus lors des tests de combustion effectués en faisant bouillir 1L d'eau pour 1kg de combustible pour chaque composition.

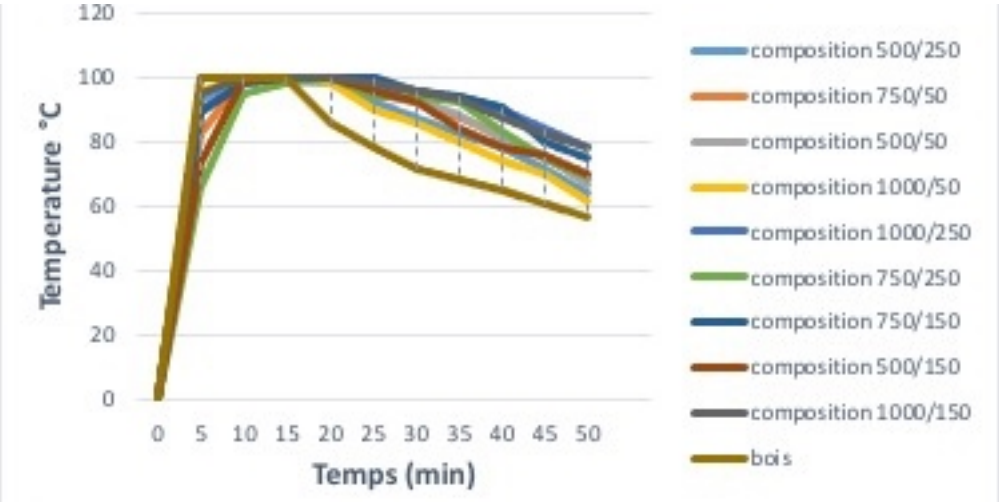


Fig. 6 : Evolution des températures par rapport aux temps des compositions

On peut remarquer que le temps d'ébullition du bois est inférieur à celui des briquettes. Cela est dû au carton qui, en augmentant la solidité de la briquette, augmente son temps de consumation. Le point faible est qu'elles sont très cendreuses à cause du carton.

En général, la prise de feu a été facile pour toutes ces briquettes mais la durée mise pour bouillir l'eau et celle de consumation diffère.

Conclusion et perspectives

L'étude a examiné les propriétés physico-énergétiques et le test de combustion des briquettes produites à partir des résidus bois (*Aucoumea klaineana* Pierre), le liant utilisé était le carton ondulé. L'étude a confirmé que les briquettes produites à partir de la compositions 1000/150, 750/150 et 1000/250 ont une meilleure qualité en termes de densité, d'agglomération, de compactage et de propriétés de combustion.

Cette étude a été capable de confirmer que les déchets du bois avec certains déchets ménagers peuvent être utilisés dans la production des briquettes de qualité ayant des données énergétiques importantes.

Ces briquettes fourniront des alternatives écologiques meilleures et efficaces à d'autres formes de source d'énergie, aider à résoudre les problèmes de gestion des déchets ménagères et de bois, et aider à la restauration des forêts déjà détruites en trouvant un bois de chauffage alternatif.

Afin d'apprécier la qualité des briquettes sur un plan global, il est préjudiciel de poursuivre des travaux afin de déterminer : taux du soufre, taux du chlore, taux de carbone fixe taux de matière volatile, taux d'azote, et analyses mécaniques et physiques.

Remerciements

Les auteurs remercient les laboratoires de l'Institut de Recherche Technologique (IRT) et l'Institut de Recherche en Ecologie Tropicale (IRET) de Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST_GABON) pour l'accueil et l'aide logistique.

Références

ADEME (2001) Mesure des caractéristiques des combustibles bois. Critt Bois, Fibois, CTBA.

Blin. J. (2005) La biomasse : Ressource énergétique. Formation et sensibilisation à la biomasse énergie. Ouagadougou le 29 Il 2005. CIRAD. 58p.

Belkadi M.A. (2009) Etude technique pour la valorisation énergétique des micro-algues. Thèse de Doctorat en Energie et Développement Durable. Facultés des sciences de l'Ingénieur. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. Algérie.79p.

ISO 17225-3:2014 (2014) Biocombustibles solides — Classes et spécifications des combustibles — Partie 3: Classes de briquettes de bois

DIN 51731 (1996) Testing of solid fuels - Compressed untreated wood - Requirements and testing

Stokke D.D., Wu Q., Han G. (2013) Introduction to Wood and Natural Fiber Composites, Wiley éd.

Safou-Tchiama R. (2005) Caractérisation physico-chimique, stabilité supramoléculaire et réactivité chimique de quelques essences tropicales. Thèse de doctorat en Sciences physique et ingénieur, Université de Bordeaux 1.

Modélisation des contraintes longitudinales dans une section de branche : modèle élastoplastique

VAN ROOIJ Arnoul[1,2], GRIL Joseph[1,2], ALMERAS Tancrède[3], BADEL Eric[1]

[1]Université Clermont-Auvergne, INRAE, PIAF F-63000 Clermont-Ferrand, France
[2]Université Clermont-Auvergne, CNRS Sigma Clermont, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France
[3]Université Montpellier, CNRS, LMGC, F-34000 Montpellier, France
arnoul.van-rooij@inrae.fr

Mots clefs : biomécanique, casse des branches, modélisation, contraintes de croissance,

Contexte et objectifs

Toute l'année, mais particulièrement pendant l'été, un phénomène encore incompris est souvent observé :la chute imprévisible et soudaine de grosses branches. Cette 'casse estivale' est à l'origine de nombreux dégâts matériels et humains. Avec l'objectif de mieux comprendre ce phénomène, le travail de thèse consiste en partie à appréhender et modéliser le comportement mécanique des branches afin de comprendre la particularité des charpentières plagiotropes. Dans ce résumé, une attention particulière est portée sur l'aspect numérique du projet. Il s'agit du développement à l'échelle de la section d'un modèle de contraintes de croissance longitudinales. Ce développement permettra à terme de prédire des caractéristiques de branches pouvant mener à des niveaux de contraintes limites vis à vis d'une potentielle casse.

Rappelons que les contraintes de croissance se mettent en place dans les arbres du fait de la mise en place progressive du bois et des sollicitations mécaniques qu'il subit à chaque étape de sa formation. Celles-ci sont de deux natures, donnant lieu à deux composantes du champ de contraintes qu'on peut supposer additives dans le cadre de l'élasticité linéaire (Thibaut et gril 2003) : d'une part le poids des nouvelles parties de l'arbre, supporté par toute la structure existante à un instant donné (contraintes de support) ; d'autre part la déformation du nouveau bois déposé en périphérie du fait de la maturation cellulaire (contrainte de maturation). La distribution des contraintes de croissance dans la tige d'un arbre, en équilibre avec l'effet de la gravité à tout instant, n'a rien à voir avec ce dont on a l'habitude en génie civil. En revanche, l'action de sollicitations à court terme, comme le vent, se traduirait par des contraintes supplémentaires conforme aux distributions habituelles lors de la flexion d'un milieu curviligne.

De nombreux modèles existent à ce jour. On mentionnera le modèle analytique de Kübler (1959a), qui est le premier modèle biomécanique de contraintes de maturation. La section est alors considérée comme homogène, la maturation des cellules instantanée et les déformations purement élastiques. Côté géométrie, la section est un disque parfait centré sur la moelle. De nombreux auteurs se sont attelés à reprendre et améliorer ce premier modèle. Fournier (1989) a proposé dans les années 1990 un modèle semi-analytique de contraintes de croissance, en prenant en compte des gradients circulaires de maturation (pour expliquer un éventuel port ou redressement), ainsi que des gradients de rigidité. Dans les années suivantes, de nombreux modèles analytiques 1D ont été développés (Alméras et al 2005, Alméras et Fournier 2009, Alméras et al 2018, Huang et al 2010). Ces derniers intègrent notamment la prise en compte de la contrainte de support.

L'objectif du travail en cours est de mettre en place un modèle semi-analytique qui prend en compte une plasticité mécanique des tissus. Dans un premier temps, nous avons confronté notre méthode de modélisation avec un code élastique, qui prend en compte bon nombre des caractéristiques développées dans la littérature : excentricité, gradient circulaire de maturation et intégration des contraintes de support (poids de la structure). Nous avons ensuite adjoint au code existant une version élastoplastique, qui présente des défauts de convergence quand l'excentricité augmente. Nous avons alors retravaillé notre méthode de maillage. Le travail en cours porte sur l'évaluation de ce nouveau maillage sur une loi élastique.

Modélisation et avancement

Discrétisation de la section transversale : Dans un premier temps, un maillage en élément carrés réguliers a été proposé. Le paramètre principal de partitionnement est le nombre d'éléments par cernes sur l'axe principal dans la configuration centrée. Une des limites de ce maillage est que lorsque l'excentricité augmente, le nombre de points de discrétisation devient très faible dans les zone où la largeur de cerne est faible, générant une limite à la bonne convergence du code dans le modèle élasto-plastique.

Dans un deuxième temps, nous avons alors fait le choix de développer un maillage irrégulier qui s'adapte à la géométrie réelle des accroissements annuels. Les éléments ne sont plus carrés ou rectangulaires, mais fait de quadrilatères suivant les directions matérielles, ici les limites de cernes. Une représentation des deux types de maillages, régulier et irrégulier, est proposée dans la Fig. 1.

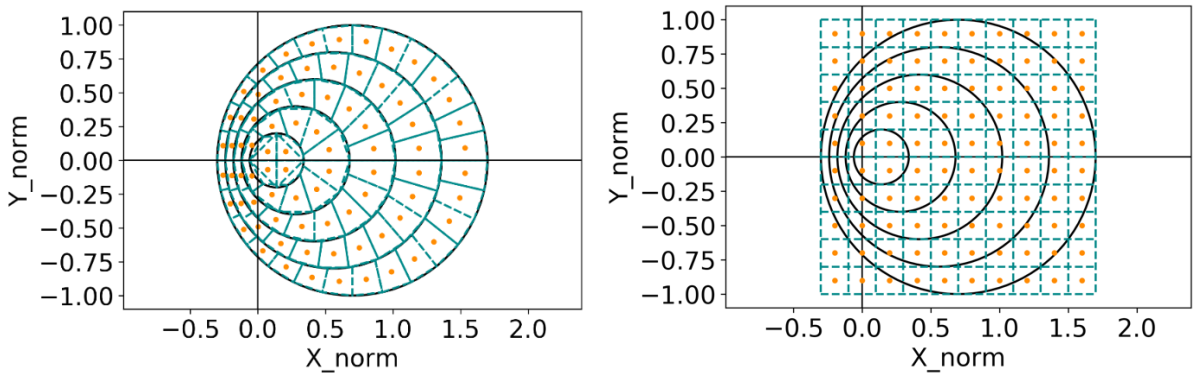


Fig. 1 : Evolution du maillage. (a) Version 1 : éléments carrés réguliers. (b) Version 2 : éléments quadrilatères suivant les caractéristiques matériaux, ici les accroissements annuels.

Méthode de calcul : Le code développé est un code semi-analytique, basé sur la discrétisation des équations d'équilibre sur la section. A chaque instant t, l'apparition et la rigidification d'un nouveau cerne vient perturber l'équilibre de la structure. Les petits incréments de contraintes qu'il engendre sont alors pris en compte pour calculer le nouvel équilibre. C'est le principe de la « bio » mécanique.

Comme précisé précédemment, le code peut prendre également en compte un gradient périphérique de maturation, ainsi qu'une excentricité. Les contraintes de support (poids de l'arbre, en permanente évolution) sont calculées et prises en compte dans le calcul des contraintes totales. Dans un premier temps, le code avec un maillage carré régulier a été testé avec une loi élastique dont on avait déterminé au préalable la solution analytique. Sur la Fig. 2 est présenté un résultat type. On y observe notamment les contraintes de support dans un axe penché, ainsi que les contraintes de maturation (avec une dissymétrie, traduisant l'éventuelle présence d'un bois de réaction). Le profil analytique de contraintes de croissance (support + maturation) correspond bien à celui obtenu avec la méthode incrémentale.

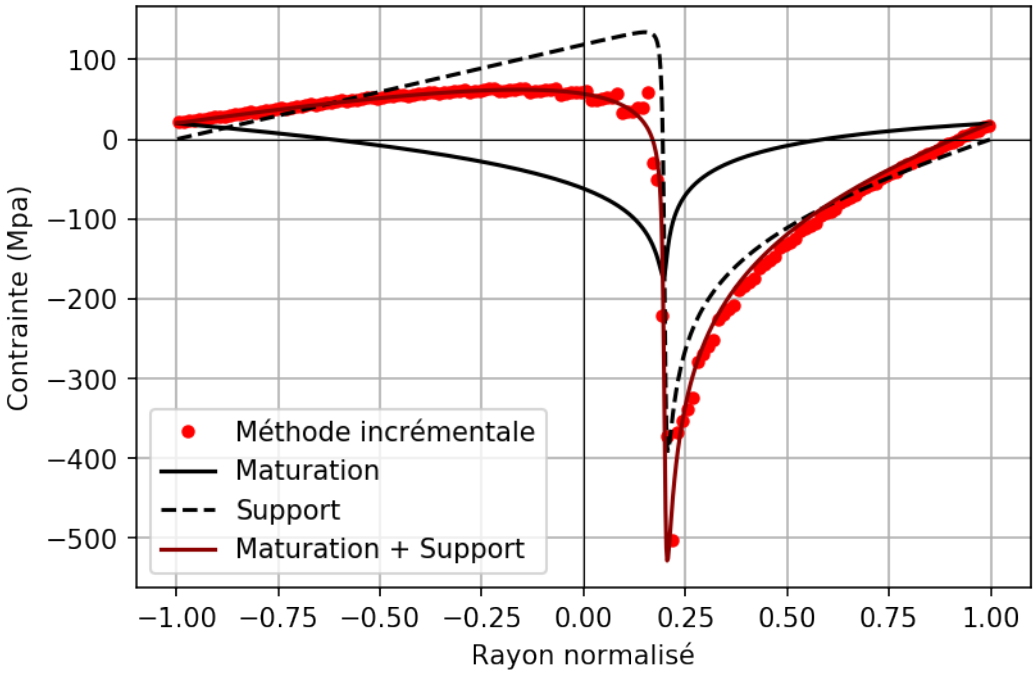


Fig. 2 : Profil diamétral de contraintes longitudinales de croissance pour un axe incliné. Excentricité e=0.2, longueur L = 1m, Rayon R = 0.1 m, angle d'inclinaison $\theta = 60°$ avec la verticale, pas de gradient de contraintes de maturation. Croissance allométrique de type $L = cR^d$ avec d = 0.4. Module d'Young longitudinal E=10 GPa.

Une fois le code éprouvé sur ce cadre analytique, nous avons commencé à travailler sur une formulation élasto-plastique. La philosophie du calcul est un peu plus complexe : à chaque fois qu'un cerne apparait, il entraine une redistribution des contraintes, qui peut potentiellement faire plastifier certains éléments. Mais il faut que la plastification de ces éléments ne vienne pas se faire un détriment du maintien de l'équilibre. Ainsi un calcul de convergence est nécessaire. Grâce à ce dernier, on obtient des profils de contraintes qui sont à la fois en plastification /endommagement quand c'est nécessaire, mais aussi en équilibre. Cette formulation, expérimentée avec un maillage régulier a montré des signes indiquant une convergence lente qui empêchait le calcul d'aboutir dans un temps correct ; ce qui a conduit au développement du maillage irrégulier adapté.

A ce stade du projet, nous avons implémenté la loi élastique au modèle que nous avons couplé au nouveau maillage. On obtient alors une partition 2D de l'état de contraintes (dont un exemple est donné sur la Fig. 3), qu'il nous faut interpoler sur l'axe qui nous intéresse. La prochaine étape est d'implémenter la loi élasto-plastique au modèle en utilisant aussi ce nouveau maillage.

Conclusion

Un modèle élasto-plastique des contraintes de croissance longitudinales est en cours de développement. Ce dernier a été testé sur un maillage de type « géométrique ». Suite à des problèmes de convergence numérique, il a été décidé d'opter pour un maillage plus représentatif de la structure multi-cernes du bois. Celui-ci permet de mieux traiter les zones délicates (les zones ou les limites de cernes sont très proches les unes des autres). Le nouveau code élasto-plastique utilisant ce maillage est en cours de développement.

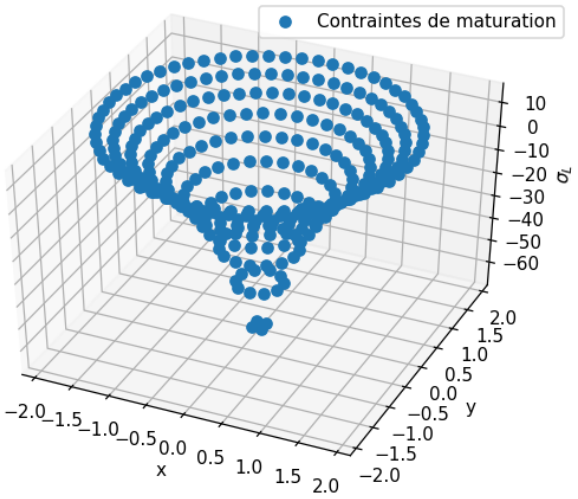


Fig. 3 : Profil de contraintes de maturation longitudinales pour un tronc droit, vertical et centré sur la moelle, obtenu à partir du code sur maillage irrégulier. On retrouve ici le modèle axisymétrique de Kübler (1959), avec l'annulation de la contrainte aux 2/3 du rayon environ.

Références

Alméras T., Fournier M. (2009) Biomechanical design and long-term stability of trees: Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction, Journal of Theoretical Biology, 256(3):370–381.

Alméras T., Jullien D., Gril J. (2018) Modelling, evaluation and biomechanical consequences of growth stress profiles inside tree stems, Springer International Publishing, pages 21–48.

Alméras T., Thibaut A., Gril J. (2005) Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. Trees, 19(4):457–467.

Fournier M. (1989) Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. PhD thesis.

Huang Y.S., Hung L.F., Kuo-Huang L.L. (2010) Biomechanical modeling of gravitropic response of branches: roles of asymmetric periphery growth strain versus self-weight bending effect. Trees, 24(6) :1151–1161.

Kübler H. (1959) Studien über wachstumsspannungen des holzes iii. längenänderungen bei der wärmebehandlung frishen holzes. Holz Rohst Werkst, 17(3) :77–86.

Thibaut B., Gril J. (2003) Growth stresses, in: Wood quality and its biological basis, J.R. Barnett, G. Jeronimidis (eds) Series: Biological Sciences Series, J.A. Roberts, P.N.R. Usherwood, Blackwell Publishing, Oxford, p. 137-156

Approche fractionnaire de Zener du comportement différé de *Millettia Laurentii* (Wengue)

NJANKOUO Jacques Michel[1], ATCHOUNGA Kuida Prisca [2], FOADIENG Emmanuel[3], TALLA Pierre Kisito [2]

[1]University of Yaoundé I, Higher Technical Teacher Training College (HTTTC), Wood Engineering Department, Ebolowa, Cameroon
[2]University of Dschang, Physics Department, Mechanics and Modeling of Physical Systems Research Unit (*UR-2MSP*), Dschang, Cameroon
[3]University of Buéa, Higher Technical Teacher Training College (HTTTC), Civil Engineering Department, Kumba, Cameroon [3]
tpierrekisito@yahoo.com

Mots clés : Bois ; *Millettia Laurentii* ; Fluage ; Dérivées fractionnaires ; Spring-pot ; Modèle rhéologique fractionnaire.

Contexte et objectif

De nos jours l'une des principales difficultés auxquelles les structures en bois sont confrontées est le phénomène de fluage qui peut induire dans les structures bois de larges déformations et même provoquer la rupture. Le fluage est le phénomène au cours duquel la déformation du matériau augmente avec le temps sous l'effet d'une charge extérieure. Il induit un accroissement de la perte de contrainte dans la structure du bois et redistribue la force intérieure des structures statiques provoquant une déformation structurelle excessive, une réduction importante de force généralisée et même une perte des appuis de la structure (Hung et Wu 2018). Avec l'emploi croissant du matériau bois dans les ouvrages d'envergure de génie civil, le fluage du bois s'impose comme un des problèmes majeurs qui met à mal le développement des structures bois, la sécurité des constructions en bois ainsi que leur stabilité à long-terme (Hung et al 2019).

Pour maîtriser ce phénomène, il est indispensable de disposer d'un modèle qui prévoit de manière précise les déformations induites dans l'élément sollicité. Dans le cas particulier du matériau bois, la non-linéarité dans le comportement différé peut s'observer aussi bien aux faibles niveaux de charge qu'aux niveaux de charge élevés (Hunt 1999). Les modèles rhéologiques généralement proposés pour décrire le fluage du bois sont tributaires de nombreux paramètres dont la détermination n'est pas toujours aisée. Au contraire, le modèle fractionnaire basé sur l'algorithme de Levenberg-Marquad utilise peu de paramètres et se trouve être assez précis. La dérivée fractionnaire est un opérateur de différentiation temporel qui rend bien compte de l'évolution d'une fonction qui varie avec le temps (Zhuoping 2005). L'essence Wengé est l'une des plus anciens matériaux de construction utilisés dans le sud du Cameroun et mérite que l'on accorde une importance particulière dans la détermination de ses caractéristiques mécaniques.

Dans ce travail de recherche, notre but est d'étudier le comportement différé de l'essence de bois *Millettia Laurentii* plus connu sous le nom de Wengé à travers une approche basée sur le calcul fractionnaire. L'un des points forts des modèles fractionnaires par rapport aux modèles classiques étant qu'ils tiennent bien compte de l'effet mémoire du matériau étudié.

Matériels et méthodes

Le pot visqueux fractionnaire ou spring-pot

En utilisant l'opérateur de calcul fractionnaire, l'équation constitutive du spring-pot (Fig. 1b) est donnée par :

$$\sigma(t) = \eta^n D_t^n \left[\varepsilon(t)\right],\ 0 \le n \le 1 \tag{1}$$

Fig. 1: (a) Pot visqueux Newtonien; (b) Spring-pot

où η^n est le coefficient de viscosité, n l'ordre de la dérivée fractionnaire, et D_t^n représente l'opérateur de différentiation fractionnaire.

$$D_t^n \left[\varepsilon(t)\right] = D D_t^{n-1} \left[\varepsilon(t)\right] \tag{2}$$

où D indique la dérivée première et l'operateur D_t^{n-1} peut être exprimé comme l'intégrale fractionnaire de Riemann-Liouville, c'est-à-dire,

$$D_t^{n-1} \left[\varepsilon(t)\right] = \int_0^t \frac{(t-\tau)^{-n}}{\Gamma(1-n)} \varepsilon(\tau)\, d\tau \tag{3}$$

où Γ est la fonction gamma. En supposant que la contrainte σ (t) est constante (σ(t) = σ) dans l'équation (1) et en calculant l'intégrale fractionnaire Eq. (3) au sens de Riemann-Liouville, nous obtenons la relation constitutive du spring-pot :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\eta^n \times \Gamma(1+n)} t^n,\ \ (0 \le n \le 1) \tag{4}$$

Etablissement du modèle rhéologique à dérivée fractionnaire

En remplaçant le pot visqueux de Newton dans le modèle classique de Zener par le spring-pot, nous obtenons un nouveau modèle rhéologique qui est constitué de l'association en série du corps Hookien et du corps viscoélastique (Fig. 2).

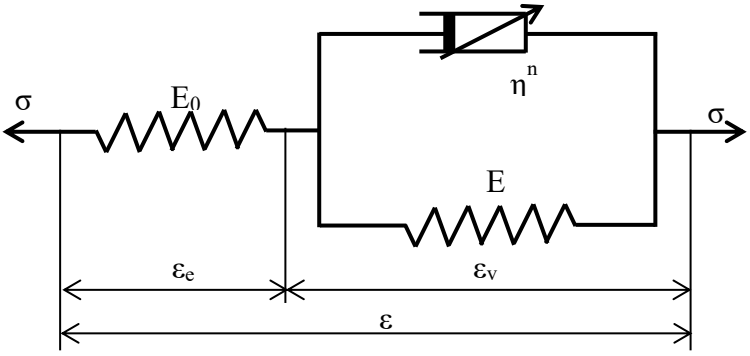


Fig. 2: Modèle rhéologique fractionnaire de Zener

De cette figure il vient que la déformation totale est donnée par :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} \tag{5}$$

où ε_e et ε_{ve} sont respectivement la déformation du corps Hookien et du corps viscoélastique. Pour le corps Hookien, la relation de constitution est donnée par :

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_0} \tag{6}$$

où E_0 est le module d'élasticité comme l'indique la Fig. 2. Pour le corps viscoélastique, la relation de constitution est donnée par :

$$\varepsilon_{ve} = \frac{\sigma}{\eta^n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{E}{\eta^n}\right)^k t^{n(1+k)}}{n(1+k)\Gamma\left[n(1+k)\right]} \tag{7}$$

où E représente le module d'élasticité, et η^n est le coefficient de viscosité du spring-pot. En substituant les équations (6) and (7) dans l'équation (5), nous obtenons la déformation totale du modèle rhéologique à dérivée fractionnaire de Zener :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\eta^n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{E}{\eta^n}\right)^k t^{n(1+k)}}{n(1+k)\Gamma\left[n(1+k)\right]} \tag{8}$$

Montage expérimental

La Fig. 3 est un schéma de l'éprouvette sur laquelle deux jauges de déformation collées au milieu des faces opposées et connectées au pont d'extensométrie permettent la mesure des déformations au milieu des faces supérieure et inférieur de la poutredont les dimensions étaient de 20mm×20mm×360mm. La Fig. 4 est une présentation simplifiée de la machine à essai de flexion quatre points, utilisée dans le cadre de ce travail.

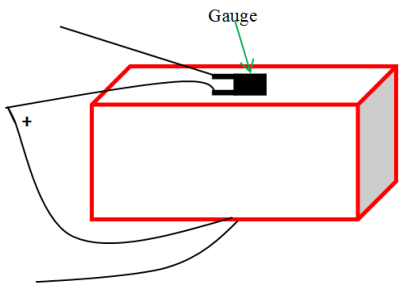


Fig. 3 : Eprouvette portant deux jauges

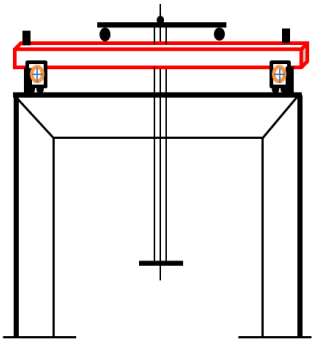


Fig. 4 : Machine d'essai de flexion

Résultats

Le Tab. 1 renseigne sur les caractéristiques mécaniques obtenus après application du modèle de Levenberg. De même, la Fig. 5 présente deux exemples de courbes théoriques du modèle de Zener et les courbes expérimentales. Pour chaque éprouvette, quatre niveaux de charge ont été considérés et le logiciel Matlab utilisé. On y observe une parfaite concordance.

Tab. 1 : Caractéristiques mécaniques optimisées du Wengué

σ (MPa)	E0 (MPa)	E (MPa)	ηn (MPa.minn)	n
38,06	8 053	72 789	1,034×106	0,335
43,03	8 331	68 594	1,028×106	0,334

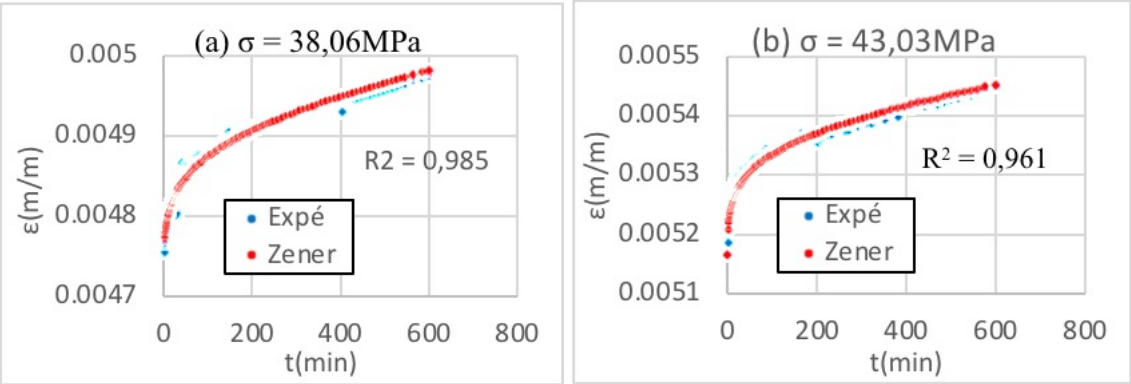


Fig. 5 : Courbes expérimentales et prévisionnelles du modèle pour
(a) 38,06 MPa et (b) 43,03 MPa

Conclusion

Dans ce travail, nous avons fait recours à la théorie du calcul fractionnaire pour étudier le fluage non linéaire du bois Wengé. Le modèle fractionnaire proposé a été vérifié et validé à travers les essais de fluage sur le bois, lesquels essais ont également permis d'étudier l'influence des paramètres. La méthodologie de détermination des paramètres du modèle développé a également été détaillée. Le modèle ainsi proposé a été validé pour deux niveaux de contrainte. Les résultats ont révélé que ledit modèle peut décrire avec une bonne précision les deux premières phases du phénomène de fluage, et qu'il pourrait être utilisé comme une référence pour le fluage non linéaire du bois. Le degré d'influence des paramètres du modèle a été déterminé, à travers l'analyse de sensibilité des principaux paramètres du modèle de fluage du bois Wengé, singulièrement la contrainte σ et l'ordre fractionnaire n. Les résultats indiquent que la contrainte est corrélée positivement avec la déformation et le taux de fluage du bois Wengé tandis que l'ordre fractionnaire est corrélé plutôt négativement avec la déformation et le taux de fluage de ce matériau bois. La déformation et le taux de déformation vont croître avec l'augmentation de σ alors qu'ils auront plutôt une allure décroissante avec l'augmentation de n. En perspective, les niveaux de charge employés dans ce travail étaient inférieurs au tiers de la charge ultime de rupture du Wengé, nous poursuivrons dans les futurs travaux l'étude de son comportement non linéaire sous des niveaux de charge élevés pouvant conduire au fluage tertiaire. Nous modifierons le modèle proposé dans ce travail en y insérant un élément qui tienne compte de l'évolution du matériau vers sa rupture, question de parachever l'étude de son comportement différé.

Références

Hung K.C., Wu J.H. (2018) Effect of SiO_2 content on the extended creep behavior of SiO_2-based wood-inorganic composites derived via the sol-gel process using the stepped isostress method. Polymers, 10, 409.

Hung K.C., Tung, L.W., Wu J.H. (2019) Long-Term Creep Behavior Prediction of Sol-Gel Derived SiO2- and TiO2-Wood Composites Using the Stepped Isostress Method. Polymers, 11, 1215.

Hunt D.G. (1999) A unified approach to creep of wood. Proc R Soc Lond A 455:4077–4095.

Zhuoping S. (2005) The variable parameter rheological model of wood. Wood Sci. Technol. 39(1):19-26.

Vibrational measurement of shear modulus and damping of wood: An application of the Vybris-Torsion device

HU Hsien-Tsung[1,2], ARNOULD Olivier[1], CARLIER Capucine[1], CAMP Gille[1], LOTTE Sylvain[2], LANGBOUR Patrick[2], BREMAUD Iris[1]
[1]Equipe BOIS, LMGC, CNRS, Université de Montpellier
[2]BioWooEB, CIRAD, Montpellier
hsien-tsung.hu@umontpellier.fr

Keywords: dynamic elastic modulus, torsion, shear, anisotropic, damping coefficient, figured wood, sycamore maple, Vybris-Torsion

Introduction

The shear properties of wood are essential mechanical properties. From an engineering point of view, it might be used for evaluating failure criteria, focusing in particular on its strength properties. In a cultural aspect, it is a factor for the sound quality of wood. It is proved that the G_{LT} shear modulus plays an essential role in the soundboard of string instruments (Viala et al. 2018). E_L/G_{LT} ratio also controls a low-pass filter for suppressing some high-frequency noises that make the sound from wood distinguished from other material (Nozaki et al. 1988). While the order of bending vibration mode raising, the shear deformation increases. As a result, the apparent E_L value also decreases (E/G). In the meantime, the tendency of damping by internal friction (tan δ) could be increased (Ono 1980, Obataya et al. 2000). Furthermore, for different instruments, the criteria for determining wood material quality is different (Brémaud 2012). For example, high damping during the high frequency vibrations and low damping in the low-frequency range are suitable for the violin, while the specific elastic modulus is more important to evaluate the wood quality for a piano (Tatemiti 1960). The sub-structure of the wood cell, especially the secondary cell wall (S2) and its microfibril angle (MFA), influences the vibrational properties, including the elastic modulus, and damping, in axial and shear (Obataya et al. 2000). In some cases, when a wood species contains many secondary metabolites (extractives), or has a great deviation of the grain angle (GA) relative to the longitudinal direction, its elastic (shearing and axial) and damping properties are also affected (Brémaud et al. 2010, Minato et al. 2010). As axial bending vibrational properties are primarily affected by MFA, while the shear vibrational properties are rather influenced by the cell-wall matrix, measuring both axial and shear properties on the same wood specimen should provide insight into the structure-chemistry-properties relationships. More generally, for evaluating the wood's quality, it is necessary to measure its anisotropic dynamic elastic modulus and damping. A compact device for the dynamic bending properties has been built in LMGC. In the present work, a new version for dynamic torsion properties was developed and tested. In order to evaluate the workability, we chose two species and compared with the literature data.

Materials and Method

Two wood species were used in the present article. One is Acer pseudoplatanus L. (sycamore maple, wavy maple), and the other one is Picea abies (L.) H. Karst (spruce). The nominal dimensions of the samples were 150 mm (longitudinal, L)×12.5 mm (radial, R, expressed as a later) ×1.75 mm (tangential, T, expressed as b later). They have been conditioned at 20±2°C and 65±5%RH for more than three weeks in order to stabilize their damping properties (Brémaud and Gril 2020).

The device was designed in order to allow, on a same measuring bench, to switch easily from the bending vibrations, to the torsion vibrations. The set-up of the torsion device itself is given in Fig. 1. The mass moment of inertia (Im) of the downer clamp (including two screws, and steel plates) was calculated, which is 2.81×10-6 kg·m2. The span (S) from the upper clamp to the downer clamp is 80 mm. The calculation of the shear modulus (in the present case, GLT) is then obtained by the acquisition of the natural torsional vibration frequency (ft) and the following equation:

$$G = \frac{12\pi^2 f_t^2 S I_m}{Cab^3} \qquad (1)$$

with C, a correcting factor for the rectangular cross section of the sample, calculated as (Ono 1980):

$$C = 1 - 0.6302/\left(\frac{a}{b}\right) \qquad (2)$$

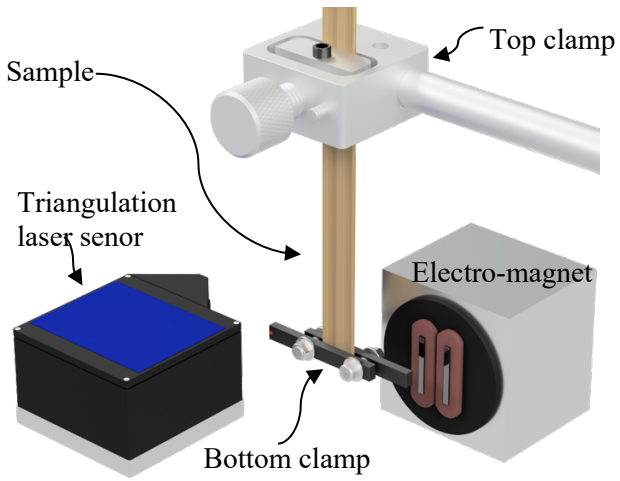


Fig. 1: The set-up of the Vybris-Torsion device. The fixed end is on the top, and the bottom clamp is sinusoidally rotated by means of an electro-magnet. On the left side is a triangulation laser sensor for the measurement of the rotation.

Results and Discussion

The longitudinal and shear modulus of 8 specimens for each species were obtained. The longitudinal dynamic elastic modulus (E_L') and damping (tan δ_L) were measured by the "classical" Vybris device (Brémaud 2006) in bending, and the frequency of the first mode of bending vibration (f^E) is listed in Tab. 1. Also, the shear modulus (G_{LT}'), the damping (by the half-power method on the bandwidth, Q^{-1}) and the natural torsion frequency (f^G) of each specimen are reported. The results show that the spruce had a lower damping value than wavy maple, both in bending (axial) and in shear. By comparing their elastic modulus, we could find that spruce had generally a larger axial modulus, but a lower shear modulus, than maple.

Compared with previous research on spruce and maple (Tatemiti 1960), all the data's value shares a similar result compared with this forced triggering experiment at around 600 Hz. When comparing the *E'/G'* ratios (not listed in the Tab. 1), the result gives a low ratio on wavy maple (4.9 ~ 6.4) but a high ratio for spruce (6.6 ~ 10.5). This gives a relatively low value compared with those from Nozaki et al (1988) where their *E'/G'* values of spruce and maple were 17.8 and 8.6, respectively. The axial-to-shear ratios in damping (tan δ_G/tan δ_L) also appear in the

lower range as compared to previous values (Carlier et al. 2018). This is currently being verified by testing more samples.

The correlation of tan δ_G/tan δ_L with *E'/G'*, which was described in the literature of (Obataya et al. 2000) (Fig. 2), shows that two species shared similar trends with ones from the literature. Therefore, we could determine the workability of the new Vybris-Torsion device, while more tests are still required.

Tab. 1 Results of two wood species for their elastic modulus and rigidity modulus tested by Vybris device

Wood Species	Values	Density (g/cm^3)	Dynamic elastic modulus				Damping (×100)	
			E_L' (GPa)	f^E (Hz)	G_{LT}' (GPa)	f^G (Hz)	Bending	Shear
Wavy Maple Acer pseudoplatanus L.	Mean	0.54	7.56	293.48	1.37	58.17	1.09	1.53
	S.D.[c]	0.01	1.10	19.90	0.12	2.56	0.12	0.13
Spruce *Picea abies* (L.) H. Karst	Mean	0.45	9.17	352.09	1.12	51.54	0.85	1.39
	S.D.[c]	0.02	0.49	13.53	0.14	2.88	0.03	0.14

a. All the significant figures were trimmed down to 2 digits after the decimal separator
b. The specific gravity and elastic modulus were all measured under the condition of 20 ± 2 °C and 65 ± 5 % RH
c. Standard deviation. The values were trimmed down as the regular a

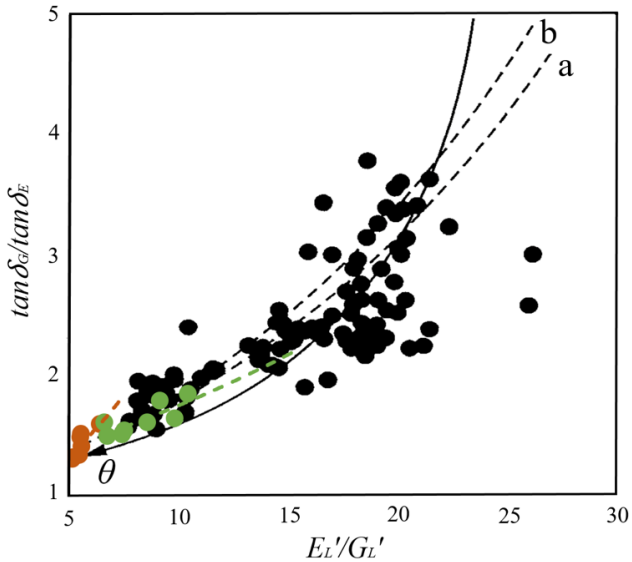


Fig. 2: A comparison of the present data with literature (Obataya et al. 2000, the figure has been revised) for the correlation of tan δ_G/tan δ_L and E_L'/G_L'. Black (literature data): the dots are the experimental values for spruce; (a) is the regression line for spruce; (b) is the regression line from 101 species; θ is the cell wall model developed in the literature. Color (present data): the orange dots correspond to wavy maple; the green dots to spruce.

Perspectives

During the first step of this work, the device was developed and several experimental factors have been tested. The new Vybris-Torsion device is now functional for conducting wide series of tests. The impact of the sample dimensions (that impacts the measuring frequency) and of boundary conditions (clamps) should be quantified. The preliminary results shown here suggest

that the range of values of measured properties are realistic when compared with literature values. The next step, which is under realization, is the measurement of a wide sampling on which axial and shear moduli and damping previously measured by other methods (Carlier et al. 2018; Viala et al. 2018). This complete comparison will be presented in the final poster. In near future, this new device is intended to be used for evaluating the axial-to-shear anisotropy of figured woods (wavy, interlocked, etc) and to relate it with effects of local GA and of MFA.

Remerciements

Le doctorant en début de 3ème année, Hsien-Tsung HU, est co-financé par l'Université de Montpellier et la Région Occitanie.

Reference

Brémaud I (2006) Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. Etude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois. (Published doctoral thesis). Université Montpellier II, Montpellier, France.

Brémaud I (2012) Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. J Acoust Soc Am 131: 807–818.

Brémaud I, Cabrolier P, Gril J, Clair B, Gérard J, Minato K, Thibaut B (2010) Identification of anisotropic vibrational properties of Padauk wood with interlocked grain. Wood Sci Technol 44: 355–367.

Brémaud I, Gril J (2020) Moisture content dependence of anisotropic vibrational properties of wood at quasi equilibrium: analytical review and multi-trajectories experiments. Holzforschung https://doi.org/10.1515/hf-2020-0028

Carlier C, Alkadri A, Gril J, Brémaud I (2018). Revisiting the notion of "resonance wood" choice: a decompartementalised approach from violin makers' opinion and perception to characterization of material properties' variability. In: Wooden Musical Instruments: Different Forms of Knowledge (Book of End of WoodMusICK COST Action FP1302), Pérez, M. A. & Marconi, E. (eds.). Philarmonie de Paris. ISBN 979-10-94642-35-1. pp 119-141 / 415p.

Minato K, Konaka Y, Brémaud I, Suzuki S, Obataya E (2010) Extractives of muirapiranga (Brosimun sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. J Wood Sci 56: 41–46.

Nozaki K, Hayashida H, Yamda T (1988) Engineering approach for piano timber - relation between material and timber. Japan Soc Mech Eng 91: 653–659.

Ono T (1980) The dynamic rigidity modulus and internal friction of several woods in torsional vibration. Mokuzai Gakkaishi 26: 139–145.

Obataya, E, Ono, T, Norimoto, M (2000) Vibrational properties of wood along the grain. Journal of Materials Science. 35: 2993-3001, 6317.

Tatemiti A (1960) Internal friction of wood used for the making of violin. Oyo buturi 29: 451–457.

Viala R, Placet V, Cogan S (2018) Identification of the anisotropic elastic and damping properties of complex shape composite parts using an inverse method based on finite element model updating and 3D velocity fields measurements (FEMU-3DVF): Application to bio-based composite violin soundboards. Compos Part A Appl Sci Manuf 106: 91–103.

Ouverture du Master Sciences du Bois à la rentrée 2021 à l'Université de Montpellier

CIANO Juliette[1], BURGERS Agnès[1,2], BARDET Sandrine[1], CLAIR Bruno[1]

[1]LMGC, Université de Montpellier, CNRS
[2] Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier
fds-master-bois@umontpellier.fr

Mots clefs : Formation ; Master ; Interdisciplinarité ; Sciences du Bois ; Objectifs pédagogiques ; Méthodes d'apprentissage

Contexte et Objectifs

Face aux enjeux environnementaux et climatiques (changement climatique, émission de polluants, raréfaction des ressources fossiles, transports intensifs, etc.), il est nécessaire de trouver des solutions plus vertueuses et respectueuses de l'environnement.

Le bois est un des matériaux phares de cette transition : son approvisionnement peut souvent être local et sa production renouvelable. Au sein même de la filière forêt-bois, l'innovation et l'amélioration des procédés est à poursuivre pour affronter au mieux les problématiques actuelles. Un besoin de professionnel·les formé.es dans la recherche et l'innovation en sciences du bois émerge.

Lors de la réunion d'un groupe de travail « Enseignement à/par la Recherche en Sciences du Bois » aux journées scientifiques du GDR Sciences du Bois 2018 à Cluny, il avait été discuté de la nécessité de monter un ou des masters pluridisciplinaires en sciences du bois. A la suite de cette rencontre un collectif de 19 chercheurs du site montpelliérain a répondu à un appel à projets "Innovation pédagogique" de l'i-site MUSE « Montpellier Université d'Excellence » et a obtenu un soutien financier pour le montage d'un master pluridisciplinaire en Sciences du Bois. Ce financement a permis le recrutement d'une coordinatrice pédagogique à mi-temps pendant un an. Depuis, l'équipe s'est élargie à 50 enseignants-chercheurs et chercheurs et le projet a été validé par la Faculté des Sciences de Montpellier qui l'a inclus dans son offre de formation LMD5. Le master accueillera ses premiers étudiants en septembre 2021. Le projet a été lauréat d'autres AAP de Muse et du LabEx NUMEV pour financer la suite du poste de coordinatrice pédagogique, les heures d'enseignement et l'équipement de salles de projet et d'un atelier bois.

Bien que cette action soit actuellement menée sur le site montpelliérain, l'enjeu de formation en sciences du bois est national et nous souhaitons cette formation en cohérence avec l'offre nationale. La présentation du master aux journées du GDR Sciences du Bois 2020 permettra de présenter le contenu pédagogique du master et les méthodes d'apprentissage envisagées. Cet espace de discussion sera également l'occasion de nouer des liens autour de la formation avec l'ensemble des acteurs de l'enseignement recherche en sciences du bois, en proposant de créer ensemble des projets pédagogiques avec les élèves et de mener des partenariats visant à enrichir la formation des futur.es étudiant.es.

Description de la formation

Le master Sciences du Bois offre une formation interdisciplinaire à Bac+5. Le bois y est abordé depuis sa formation dans l'arbre jusque dans ses usages en tant que matériaux ou molécules, mettant en œuvre des compétences en biologie, écologie, chimie, physique, mécanique, génie

civil et génie des procédés. Une attention particulière sera portée sur les compétences transversales assurant l'adaptabilité des diplômé.es au secteur de l'éco-ingénierie et des matériaux biosourcés (gestion de projet, résolution de problème, démarche scientifique, intelligence collective…).

Le master sera ouvert aux étudiants de licence ayant des bases solides dans au moins un des trois grands champs thématiques des sciences du bois : biologie végétale, chimie organique, physique et mécanique des matériaux.

La formation démarrera en septembre 2021 pour accueillir 20 étudiants en première année de master, puis 20 étudiants par an et par niveau (master 1 et master 2) les années suivantes. Une partie des étudiants pourra suivre le cursus en apprentissage.

Débouchés

Les débouchés envisagés sont les métiers de la recherche, les postes de cadres dirigeants et R&D dans les entreprises de première et seconde transformation (scierie, fabrication de panneaux, ameublement, structure, construction, papeterie, industrie pharmaceutique, etc.), et les collectivités territoriales, notamment parmi les nombreuses communes forestières d'Occitanie qui cherchent à valoriser leur patrimoine forestier.

Formation

La formation s'articule autour de 11 items illustrés en Fig. 1. Les deux années d'études sont divisées en unités d'enseignements (UE) listées au Tab. 1.

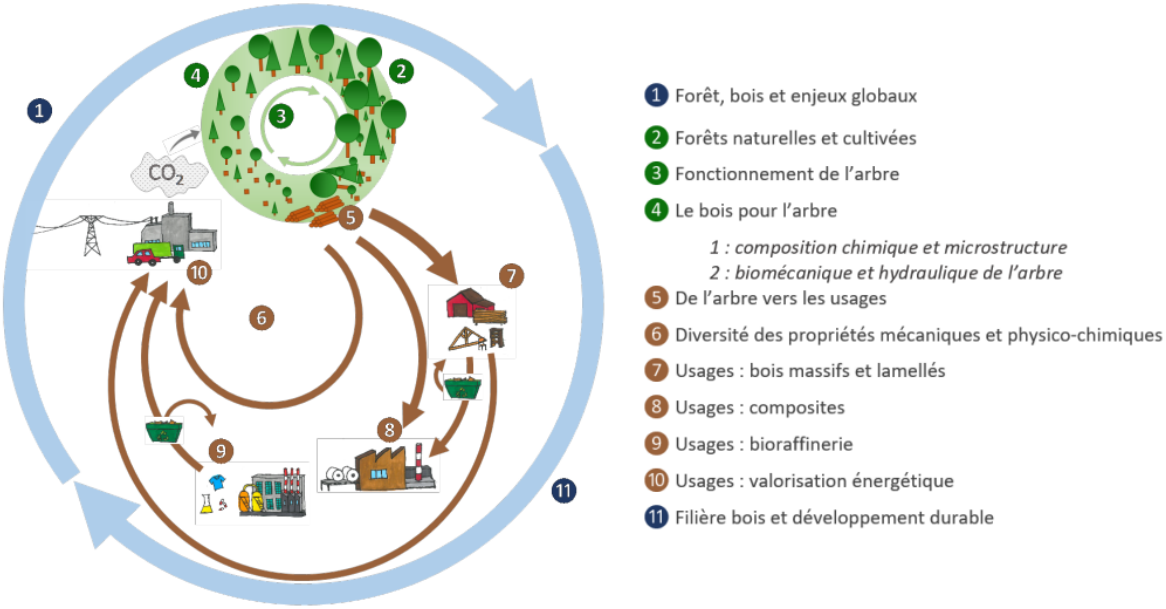


Fig. 1 : Schéma des items interdisciplinaires de la formation

M1		
UE	**ECTS**	**Disciplines**
semestre 1		
(1) Forêts, bois et enjeux globaux	3	Forêt, Environnement/DD, SHS/Economie
(4) Le bois pour l'arbre 1 : composition chimique et microstructure	5	Biologie, Chimie/Energie
(3) Fonctionnement de l'arbre	4	Biologie, Environnement/DD
(6) Diversité des propriétés mécaniques et physico-chimiques	5	Mécanique/Physique, Chimie/Energie
Analyse de données et statistiques appliquées aux sciences du bois	3	Maths/Statistiques
Projet interdisiciplinaire "fil rouge" 1	3	Interdisciplinaire
Projet personnel et motivations	2	Compétences pré-professionnelles
Etude de cas en sciences du bois	5	Interdisciplinaire
semestre 2		
(5) De l'arbre vers les usages	5	Forêt, Mécanique/Physique, Technologies/Production, Chimie/Energie
(4) Le bois pour l'arbre 2 : biomécanique et hydraulique de l'arbre	3	Biologie, Mécanique/Physique
Projet interdisiciplinaire "fil rouge" 2	5	Interdisciplinaire
English for wood sciences	2	Langue, Interdisciplinaire
Stage	15	Compétences pré-professionnelles
M2		
semestre 3		
(2) Forêts naturelles et cultivées	5	Forêt, Envionnement/DD
(7-8) Usages bois massifs, panneaux et composites	6	Mécanique/Physique, Technologies/Production, Chimie/Energie
(9-10) Bioraffinerie et valorisation énergétique	6	Technologie/Production, Chimie/Energie
Insertion professionnelle et communication	5	Compétences pré-professionnelles
Projet interdisiciplinaire "fil rouge" 3	6	Interdisciplinaire
English for wood sciences	2	Langue, Interdisciplinaire
semestre 4		
(11) Filière bois et développement durable	3	Environnement/DD, SHS/Economie
Projet interdisiciplinaire "fil rouge" 4	6	Interdisciplinaire
Projet R&D	6	Compétences pré-professionnelles
Stage	15	Compétences pré-professionnelles

Tab. 1 : Les unités d'enseignements (UE) en Master 1 (M1) et Master 2 (M2)

Deux stages d'au moins 4 mois, un en entreprise et un en recherche académique, seront menés sur les deux années. La formation est accessible en alternance dès le M1 ou à partir du M2.

Le Master Sciences du Bois repose sur des formes d'apprentissage innovantes : apprentissage par problème et par projet (APP), interdisciplinarité, projet fil rouge du M1 au M2, projet Recherche et I en M2, sorties terrains, autonomie, développement du projet personnel.

Listes des laboratoires et des partenaires

Le master est porté par des enseignants-chercheur·es et chercheur·es de 12 laboratoires de recherche du site Montpelliérain :

AMAP (Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des Végétations), **ART-Dev** (Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement), **CEFE** (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive), **Cirad BioWooEB** (Biomass, Wood, Energy, Bioproducts), **Cirad Forêts & Société**, **IATE** (Ingénierie des Agropolymères et Technologies Émergentes), **Eco&Sols**, **IBMM** (Institut des Biomolécules Max Mousseron), **ICGM** (Institut Charles Gerhardt Montpellier), **ICSM** (Institut de Chimie Séparative de Marcoule), **ISEM** (Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier), **LIFAM** (Laboratoire Innovation Formes Architectures Milieux), **LMGC** (Laboratoire de Mécanique et Génie Civil), **PCH** (Polymères, Composites et Hybrides).

Le master est soutenu par : MUSE, Cirad, Numev, IMT Mines d'Alès, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, Fondation Alpes Contrôle, l'Office National des Forêts Occitanie et FIBois Occitanie.

Simplified finite element model for natural frequencies estimation of CLT-concrete composite beams using notched connectors

THAI Minh-Van[1,2], ELACHACHI Sidi Mohammed[1],
GALIMARD Philippe[1], MENARD Sylvain[2]

[1] I2M, University of Bordeaux, 33000 Bordeaux, France.
[2] Université du Québec à Chicoutimi, Canada.
minh-van.thai@u-bordeaux.fr

Keywords: CLT, CLT-concrete composite, timber-concrete composite, notched connectors, bending stiffness, bending modulus, dynamic behavior, vibration, fundamental frequency, damping, FEM model.

Context and objective

Cross-laminated timber (CLT) is an engineered wood product made of multiple glued layers to form a panel. Each layer of the CLT is oriented perpendicular to the adjacent one. This type of structural element is widely used recently and notably suitable for the floor system. Recently, large residential building design demands timber floor systems with long spans (from 8 to 10 m). A conventional CLT floor usually has a maximum clear span of about 6-7 m. From medium to long-span floor systems, the vibrational condition is commonly the factor that controls the design. The solution is adding a concrete layer with the composite action between timber and concrete, increasing the floor stiffness. However, for the CLT-concrete composite (CCC) structure, the concrete slab usually does not collaborate with the CLT layer as a composite structure. The reasons are the high cost of the composite connector and lack of knowledge about the impact of the composite effect on CCC floors vibrational performance.

This study proposes a simplified unidimensional model to estimate the natural frequencies of CCC beams using notched connectors. Three CCC beams were subjected to vibration tests to determine their natural frequencies and modal damping. Experimental results were then compared to numerical results from the FE and analytical models.

Experimental approach

Specimens: The CLT has grade E1 complying with the standard PRG-320 (2019). The local supplier provided the concrete material with the indicated class of C35. The compression test conducted on the cylinder specimens yielded a mean compression strength f_c of 36.8 MPa and a mean modulus of elasticity E_c of 26773 MPa.

Three CCC beams (Fig. 1) with the dimensions of 9 × 1m (length × width) had been fabricated. The beams had different composite levels. The first one (beam 1, icon as) had no notches, hence, non-composite. The two others (beam 2 and beam 3) had a different number of notches (beam 2 has one row of 10 connectors while beam 3 has 26 connectors distributed in 3 rows), consequently have low- and high-level composite. The beam span, the distance between the supports, is of 8.7m. The CLT panels were delivered with pre-cut notches with dimensions of 200×200×25mm (length×width×depth). The individual notched connectors specimens were fabricated and tested under another test campaign to determine their stiffness and resistance. The connector stiffness (k), obtained from the static shear test, was 242 kN/mm with the coefficient of variation (CoV) of 13%. The load-slip curves of tested specimens could be found in the study of Thai et al. (2020).

Fig. 1: Plan of beam 3 and real image of the beams before concrete casting

Vibration test: A vibration measurement generally requires several hardware components. The basic hardware element consists of a source of excitation (exciter) for providing a force to the structure, a transducer to convert the structure motion into an electrical signal (Ljunggren 2006). Fig. 2 shows the grid of acquisition points on the beams, with the accelerometer and the hammer impact locations. The desired frequency range conditioned the longitudinal spacing of the grid. In our case, it is up to the fifth bending mode, *i.e.*, ~100 Hz. Since point 15 was optimal for the measurement (exciting both flexion and torsion mode), all the vibration tests had it as a reference point.

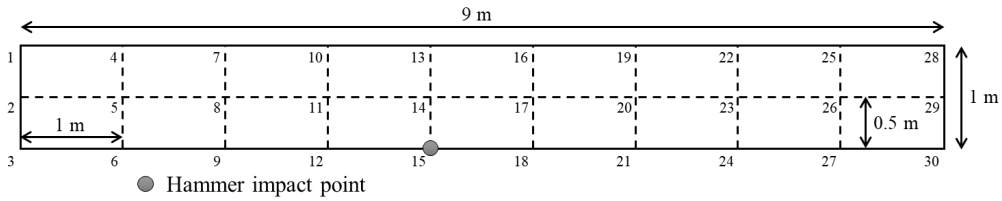


Fig. 1: Accelerometer plan with the hammer impact location

Models for natural frequencies estimation

Analytic models: The natural frequencies could be determined by the analytic expression proposed by Wu et al. (2007). Based on the Euler-Bernoulli beam theory, the exact solution of frequency for a composite section with two sub-elements of different materials can be obtained:

$$f_n = \frac{n^2\pi}{2}\sqrt{\frac{EI_{eff}}{mL^4}}, \qquad EI_{eff} = \overline{EI}\left[1 - \frac{\beta^2 - 1}{\frac{\tilde{\alpha}^2}{(\boldsymbol{n}\pi)^2} + \beta^2}\right] \qquad (1,2)$$

with

$$\tilde{\alpha}^2 = \frac{k}{s}L^2\left(\frac{1}{E_1A_1} + \frac{1}{E_2A_2} + \frac{h^2}{\Sigma EI}\right); \quad \beta^2 = \frac{\overline{EI}}{\Sigma EI}; \quad \overline{EI} = \Sigma EI + \frac{E_1A_1E_2A_2}{E_1A_1 + E_2A_2}h^2; \qquad (3,4,5)$$

where $\overline{EI}$ is the flexural stiffness of a fully composite beam, β is a parameter related to the geometry and modulus of elasticity of the materials, $\tilde{\alpha}$ is a parameter involving the stiffness of the shear connector, m and L are the mass and the length of the beam, k denotes the shear stiffness of the connector, s is the connector spacing.

Finite element model: the model needed to be simple for engineering implementation and future optimization study. Therefore, the unidimensional model was built in Abaqus CAE software. The model used beams elements in a plane B21 (2-node linear beam) for both timber and concrete materials. The beam elements are shear deformable and account for finite axial strains. They have three degrees of freedom at each node: two translational and one rotational about the normal to the model plane. Connectors were modeled as springs elements in the horizontal direction. The stiffness of the spring element was defined as a constant. The concrete was modeled as isotropic material. The information about concrete material was based on the

compression stress of cylindrical specimens. The average MOE in compression of concrete 28 days after casting was of 26.8 GPa. The timber was also modeled as isotropic material with bending MOE along the major strength axis E_b as the modulus. The bending MOE of timber was taken from a preliminary dynamic calibration. Timber Poisson ratio and density are 0.2 and 2450 kg/m^3, respectively. The model schematic of CLT-concrete beams is presented in Fig. 3 where h_c and h_t are thickness of concrete and timber layer, respectively.

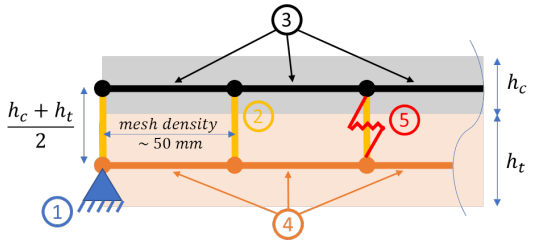


Fig. 3: Composite beam FEM model: (1) support; (2) vertical strut elements, rigid in terms of axial stiffness; (3) concrete elements; (4) timber elements; (5) horizontal connector elements, a spring element with defined horizontal stiffness (connector stiffness)

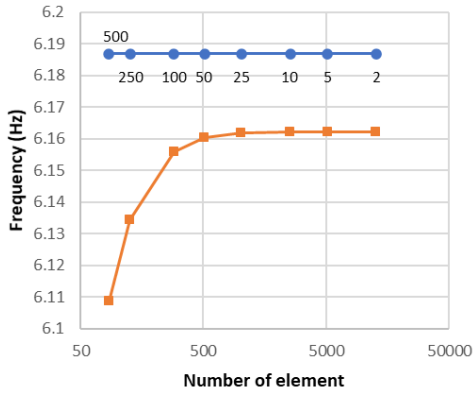


Fig. 4: Mesh sensitivity, data labels represent the corresponding element size

The mesh density is the question addressed adequately elsewhere (Turmo et al. 2015). It is known that the distance between vertical strut influences the results of the analysis: the smaller distance would lead to a more accurate result. In this study, mesh density is the length of individual concrete (or timber) element. The element size (distance between vertical struts) was fixed at 50 mm based on the mesh sensitivity study (Fig. 4). The blue points were the results of the analytical expression presented in Eq. 1-5. The calculation time per simulation was about less than 1 second.

Results and discussion

Tab. 1 presents the vibration test results of bare CLT beams and the CCC beam 28 days. The fundamental frequency results showed an increase of 15%, 24%, and 28% in beam 1, 2, and 3, respectively. The presence of connector systems also enhanced the fundamental frequency by 8% (beam 1 vs. beam 3 at 28 days)

Tab. 1 : Experimental results of bare CLT beams and CCC beams at 28 days

	Beam 1		**Beam 2**		**Beam 3**	
			Bare CLT beams			
Mode	Freq.	Damping	Freq.	Damping	Freq.	Damping
1	4.30 Hz	0.6 %	4.26 Hz	0.5 %	4.17 Hz	0.6 %
2	16.49 Hz	1.0 %	15.70 Hz	0.2 %	15.50 Hz	0.9 %
			CCC beams at 28 days			
1	4.95 Hz	2.1 %	5.27 Hz	1.2 %	5.35 Hz	0.6 %
2	16.02 Hz	2.9 %	18.11 Hz	1.9 %	18.52 Hz	1.6 %

The confrontation model – experiments carried out based on the test results of CLT-concrete composite beams. Tab. 2 presents the CLT panel and connector characteristics and natural frequencies from experimental tests and models. Normalized relative frequency difference NRFD (in %) was defined as:

$$NRFD = \frac{|f_{experiment} - f_{model}|}{f_{experiment}} \quad (6)$$

The frequency calculated by Wu et al. (2007) method and the finite element model were in good agreement, especially in the low- and high-composite beams. The FE could predict the natural frequencies with relatively low NRFD. There is an unexpected high fundamental frequency in the non-composite beam. Both analytical and numerical models cannot capture the fundamental frequency of beam 1. This implied that other phenomena might occur, such as friction at the interface or viscous-elastic properties of timber during the vibration.

Tab. 2 : Natural frequencies comparison between experiments and models results

Beams	CLT E_b (GPa)	Connector k (kN/mm)	f_1 (Hz)			f_2 (Hz)			$NRFD\ f_1$(%)		$NRFD\ f_2$(%)	
			Exp.	Wu	FE	Exp.	Wu	FE	Exp-Wu	Exp-FE	Exp-Wu	Exp-FE
1	9.2	0	5,0	2,9	2,9	16	12	11	42	41	28	28
2	9.0	334	5,3	5,0	5,0	18	17	15	4	6	7	15
3	8.5	1001	5,4	5,3	5,2	19	19	18	1	2	-4	5

Conclusion and perspective

The composite beams have a fundamental frequency of about 5.3 to 5.4 Hz and the damping about 1%. Correspondingly, they are 5.0 Hz and 2% for the non-composite beam. The addition of the concrete layer increased the performance of CLT panels significantly.

The proposed simplified finite element model could be used as a quick implementation to evaluate naturals frequencies, especially in complex structures. The application would not be limited to CCC beam structures but could be possible for the CCC floor systems. The only drawback of a simplified model is that they cannot describe the notched connector influence (depth, length, the distance between notches) locally.

Acknowledgment

The authors are grateful to Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for the financial support through its IRC and CRD programs (IRCPJ 461745-18 and RDCPJ 524504-18), the Region Nouvelle Aquitaine for the financial support (ref. 2017-1R10223), and the industrial partners of the NSERC industrial chair on eco-responsible wood construction (CIRCERB).

References

ANSI/APA PRG-320-2019 (2019) Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. APA - The Engineered Wood Association.

Ljunggren F. (2006) Floor Vibration - Dynamic Properties and Subjective Perception. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology.

Thai, M.V., Ménard S., Elachachi S.M., Galimard P. (2020) Performance of Notched Connectors for CLT-Concrete Composite Floors. Buildings 10 (7): 122.

Turmo J., Lozano-Galant J.A., Mirambell E., Xu D. (2015) Modeling Composite Beams with Partial Interaction. Journal of Constructional Steel Research 114 (November): 380–93.

Wu Y.F., Xu R.Q., and Chen W.Q (2007) Free Vibrations of the Partial-Interaction Composite Members with Axial Force. Journal of Sound and Vibration 299 (4–5): 1074–93.

Mesure du fluage en cisaillement roulant dans la flèche des panneaux CLT

ALLEMAND Charlotte[1,2], LEBEE Arthur[1], PINOTEAU Nicolas[2], FORÊT Gilles[1]

[1] Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, IFSTTAR, CNRS, Université Paris Est, Champs-sur-Marne, France
[2] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Université Paris Est – Marne la Vallée, France
charlotte.allemand@cstb.fr

Mots clefs : Fluage ; Bois Lamellé Croisé ; Cisaillement Roulant

Contexte et objectifs

En 2024 le village olympique et paralympique sera en bois. Ce matériau sera imposé pour toutes les constructions de moins de 28 mètres et préconisé au-delà de cette hauteur. Les murs et les planchers seront conçus avec des panneaux de bois lamellé croisé (cross laminated timber, CLT). Il s'agit de panneaux composés de lames de bois croisées perpendiculairement. Ce projet reflète l'essor que connait le bois, notamment le CLT, dans la construction ces dernières années.

En raison du croisement des couches, les déformations en cisaillement roulant jouent un rôle important dans la réponse mécanique des panneaux de CLT à court et à long terme. La valeur du module de cisaillement roulant $G_{r,mean}$ à court terme, se situe entre 50 et 200 MPa (Ehrhart et al. 2018, Franzoni et al. 2016), ce qui est environ 200 fois inférieur au module d'Young longitudinal. Les grandes différences entre les études sont dues à la difficulté d'obtenir une contrainte de cisaillement pure et de représenter le comportement des couches croisées.

L'Eurocode ne prend pas en compte l'hétérogénéité des panneaux de CLT puisque la valeur de k_{def} est identique quelle que soit la direction considérée. De nouvelles recommandations sont en cours de rédaction. Il est cependant nécessaire d'avoir une connaissance plus précise du comportement à long terme des effets dus au cisaillement roulant.

Bien que l'on puisse trouver des expériences qui mesurent le fluage CLT (Pirvu et Karacabeyli 2014, Colling 2014), la caractérisation du fluage par cisaillement de roulement dans un environnement contrôlé sur une longue période est encore nécessaire. Un protocole expérimental pour mesurer la rigidité au roulement et le fluage des panneaux CLT et ses premiers résultats sont présentés ici.

Matériel et méthodes

La méthodologie présentée a été développée par Perret et al (2018) pour des essais à court terme. Des essais de flexion 4-points sont réalisés sur des poutres sandwich de 800 mm de longueur et de section 40 mm sur 30 mm. L'âme de la poutre est constituée de plusieurs planches de bois et les couches supérieures et inférieures sont en tôle d'acier (Fig. 1). Afin d'appliquer le modèle des poutres sandwich on doit avoir $E_a e_a >> E_b e_b$, $e_b >> e_a$ ce qui est vérifié ici, avec E_a = 210 GPa le module des peaux, e_a = 1.2 mm leur, E_b = 0.43 GPa le module de l'âme et e_b = 30 mm son épaisseur Les tôles d'acier contribuent alors principalement à la rigidité en flexion D et l'âme de la poutre contribue seule à la rigidité en cisaillement F :

$$D = \frac{b(h^3 - e_b^3)}{12} E_a \qquad (1)$$

$$F = \frac{b(e_b + e_a)^2}{e_b} G_{r,mean} \tag{2}$$

avec $h = e_b + 2e_a$ l'épaisseur totale et b la largeur de la poutre.

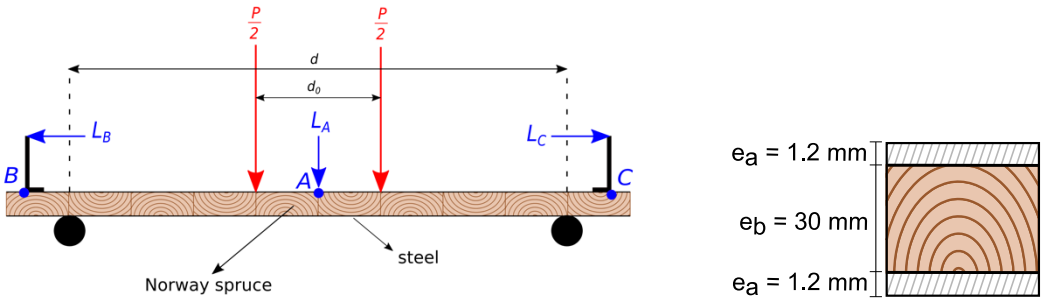


Fig. 1 : Essai de flexion 4-points sur une poutre sandwich

La poutre est simplement supportée sur une portée de d = 600 mm et deux charges P/2 sont appliquées à une distance d_0 = 200 mm. On peut alors estimer la rigidité en flexion D à partir des rotations mesurées en B et C, notées φ_B and φ_C :

$$D = \frac{P(d^2 - d_0^2)}{16\Delta\varphi} \tag{3}$$

où $\Delta\varphi = (\varphi_B + \varphi_C)$.

La rigidité en cisaillement roulant F peut alors être exprimée comme une fonction de la flèche f_A et de la rigidité en flexion D :

$$\frac{1}{F} = \frac{4 f_A}{P(d - d_0)} - \frac{1}{8D}\left(d^2 - \frac{1}{3}(d - d_0)^2\right) \tag{4}$$

Cinq échantillons (poutres A à E) sont fabriqués selon un protocole précis et sont gardés à humidité constante dans le bois de H = 10.6 ± 0.3 % pendant toute la durée de l'essai. La limite viscoélastique a été principalement étudiée dans la direction longitudinale et a été déterminée à 40% de la charge limite. Cette valeur n'est à priori pas la même dans la direction de cisaillement roulant. De ce fait, les échantillons ont chacun été soumis à différentes charges ; de 27 à 52% de la charge limite.

L'essai est effectué dans une pièce à température et humidité constante avec T = 18.8°C ± 1.1°C et HR = 58% ± 8%. L'essai a été lancé le 13 mars 2020 et est toujours en cours à la date de soumission de ce papier.

Résultats et discussion

La force P est tracée en fonction de la partie symétrique des rotations $\Delta\varphi$. Une régression linéaire sur la partie linéaire de cette courbe permet de retrouver le module de Young des peaux en acier. La même méthode est utilisée afin de déterminer le module de cisaillement instantané en traçant la force P en fonction de la flèche au centre f_A. Le Tab. 1 résume les résultats trouvés. L'erreur sur les peaux en acier est faible ce qui permet de valider le procédé. Le module de cisaillement est $G^0_{r,mean}$ = 97.7 MPa avec un coefficient de variation de 7.2% ce qui est cohérent avec les résultats trouvés dans Ehrhart et Brandner (2015).

Tab 1: Valeurs instantanées

Nom	A	B	C	D	E	Moyenne	CoV1 (%)
$G^0_{r,mean}$ (MPa)	89.3	105	91.3	103	100	97.7	7.2
Ea (GPa)	205	212	204	206	204	206	1.74

[1] Coefficient de variation

Sur la Fig. 2, le fluage relatif est tracé pour le cisaillement roulant de chaque poutre. Le fluage du bois a été modélisé à l'aide de lois empiriques (lois puissance) ou dérivées de la thermodynamique. Les modèles empiriques bien qu'ils n'aient pas de justification théorique permettent de mieux prédire le fluage du bois. La loi (1) utilisée ici a été développée par Youngs (1957) :

$$\frac{J(t)}{J_0} - 1 = mt^n \tag{5}$$

avec n, m et J_0 des paramètres expérimentaux et t le temps en secondes. C'est cette équation qui a été utilisée afin de modéliser le comportement dans la Fig. 2. La modélisation a été faite en prenant $t_0 = 1$ s, ce qui correspond à la fin du chargement de l'échantillon.

L'Eurocode définit k_{def} une constante qui permet de calculer le fluage à 50 ans et de dimensionner les bâtiments en conséquence. La variable k^G_{def} est définie pour les déformations dues au cisaillement roulant et exprimée par :

$$G^{\infty}_{r,mean} = \frac{G^0_{r,mean}}{1+k^G_{def}} \tag{6}$$

avec $G^0_{r,mean}$ le module instantané de cisaillement roulant et $G^{\infty}_{r,mean}$ le module sécant à 50 ans.

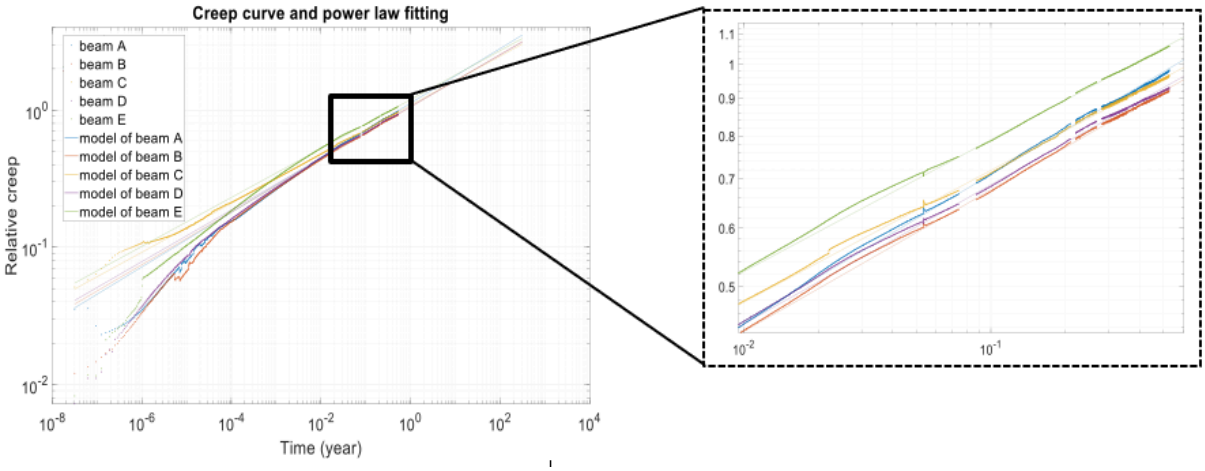


Fig. 2 : Modélisation de k_{def}.

Une régression linéaire a été effectuée sur les données logarithmiques. Cette régression est visible Fig. 2 où k^G_{def} (relative creep) est tracé en fonction du temps en échelle logarithme. La moyenne des valeurs de k^G_{def} trouvées est 2.3 avec un coefficient de variation de 7.5%.

Le niveau de charge semble ne pas avoir d'influence sur la valeur de k^G_{def} ce qui valide l'hypothèse de viscoélasticité faite.

Conclusion et perspectives

La valeur du k_{def}^{G} trouvée de 2.3 est très élevée par rapport aux normes actuelles (k_{def} = 0.6) mais n'est pas incohérente avec les précédents travaux portant sur sa caractérisation (Pirvu 2014, Colling 2014). En effet, la flèche des panneaux de CLT est composée d'une partie venant des déformations longitudinales et d'une seconde partie venant de celles en cisaillement. La contribution en cisaillement dans le fluage global dépend de l'élancement du panneau. Cette contribution varie de 30% pour des panneaux peu élancés à quelques pourcents pour des panneaux qui le sont plus. D'autres essais doivent être effectués afin de disposer de résultats statistiquement représentatifs. Si ces valeurs sont validées cela aura des conséquences pour le dimensionnement des panneaux de CLT et pourrait indiquer qu'il est nécessaire de différencier les directions de fluage dans les produits du bois.

Références

Colling F. (2014) Creep Behavior of Cross Laminated Timber in Service Class 2. In Technical Report, 10. Hochschule Augsburg, University of Applied Science.

Ehrhart T., Frangi A., Schickhofer G., Brandner R. (2015) Rolling Shear Properties of Some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration and Parameter Study. ETH Zurich. https://doi.org/10.3929/ethz-a-010548168.

Ehrhart T., Brandner R. (2018) Rolling Shear: Test Configurations and Properties of Some European Soft- and Hardwood Species. Engineering Structures 172:554-72. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.118.

Franzoni L., Lebée A., Lyon F., Foret G. (2016) Influence of Orientation and Number of Layers on the Elastic Response and Failure Modes on CLT Floors: Modeling and Parameter Studies. European Journal of Wood and Wood Products 74 (5):671-84. https://doi.org/10.1007/s00107-016-1038-x.

Perret O., Lebée A., Douthe C., Sab K. (2018) Experimental Determination of the Equivalent-Layer Shear Stiffness of CLT through Four-Point Bending of Sandwich Beams. Construction and Building Materials 186:1132-43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.102.

Pirvu C., Karacabeyli E. (2014) Time-Dependent Behaviour of CLT, 2. World Conference on Timber Engineering.

Youngs R.L. (1957) The Perpendicular-to-Grain Mechanical Properties of Red Oak as Related to Temperature, Moisture Content and Time. Time. Ph. D. Thesis Yale Univ.

Activité anti-termite de résidus d'hydrodistillation de trois plantes acclimatées au Burkina-Faso

SANKARA Assétou[1], OUEDRAOGO Jean Claude W.[1], PIGNOLET Luc[2,3], THEVENON Marie-France[2,3], BONZI-COULIBALY Yvonne[1]

[1] Laboratoire de Chimie Analytique, Environnementale et Bio-organique, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso
[2] UR BioWooEB, CIRAD, Montpellier, France
[3]BioWooEB, Université de Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
marie-france.thevenon@cirad.fr

Mots clefs : Résidus, Hydro-distillation, Plantes aromatiques, Profil chimique, Activité anti-termites

Contexte et objectifs

Les plantes aromatiques sont utilisées depuis les temps anciens en médecine, en cosmétique ainsi que pour préserver et améliorer la saveur des aliments. Leurs propriétés bénéfiques ont été principalement attribuées à la présence d'huiles essentielles. Ces huiles essentielles sont habituellement obtenues à partir du matériel végétal brut par distillation à la vapeur ou par hydro-distillation.

Cette distillation génère des résidus à la fin du processus. Ces résidus sont très peu ou pas du tout valorisés, alors qu'ils sont une source potentielle de composés bio-actifs, dont des composés phénoliques à forte valeur ajoutée (Sankarikutty et Narayanan 2003).

La menthe, la citronnelle et l'eucalyptus, trois plantes acclimatées au Burkina Faso et exploitées pour leurs huiles essentielles, ont été considérées. L'objectif de ce travail est d'évaluer les propriétés chimiques et termicides des résidus d'hydro-distillation de ces 3 plantes.

Matériels et méthodes

Les parties aériennes de menthe (*Mentha piperita*), citronnelle (*Cymbopogon citratus*) et d'eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*, feuillage), ont été collectées à Ouagadougou (Burkina Faso) en mars 2018. Après séchage et broyage, ces plantes ont subi une hydro-distillation. Les résidus obtenus ont été filtrés, puis :

- les résidus aqueux ont été lyophilisés (extrait aqueux),
- après séchage, les résidus solides ont macéré dans l'éthanol pendant 24h. Un extrait éthanolique a été récupéré après évaporation du solvant.

Ces extraits aqueux et éthanoliques ont été utilisés pour déterminer leur teneur en polyphénols, en flavonoïdes et leur activité anti-oxydante (Sankara et al. 2020). Leur activité a aussi été testée vis-à-vis des termites *Reticulitermes flavipes*. 30µL d'extrait sont déposés sur un papier Joseph (cellulose pure) d'un cm^2. Ce papier est introduit dans une boîte de Pétri avec 20 termites ouvriers. L'exposition dure jusqu'à 24 jours. On compte alors les termites survivants et on évalue la surface dégradée du papier (Sankara et al. 2020).

Tous les essais sont répétés 3 fois.

Résultats

Les taux d'extraction des résidus (Tab. 1) indiquent que la quantité d'extrait des résidus d'hydro-distillation n'est pas négligeable. Les teneurs en polyphénols et flavonoïdes, ainsi que l'activité anti-oxydante sont présentés dans le Tab. 2.

Tab. 1 : Taux d'extraction (% masse d'extrait/masse de plante séchée initialement utilisée)

Plante	C. citratus	E. camaldulensis	M. piperita
Extrait aqueux	17,80	28,60	26,85
Extrait éthanolique	04,63	13,64	04,45
Total	22,43	42,24	31,30

Tab. 2 : Teneur en polyphénols, flavonoïdes et activité anti-oxydante des extraits de plantes

Extraits	Teneur en polyphenols (mg GAE*/g extrait sec)	Teneur en flavonoïdes (mg QE**/ g extrait sec)	DPPH IC_{50} (mg/ml)
CA	66,21 ± 4,15	17,11 ± 0,34	1,67 ± 0,21
CE	74,17 ± 13,53	185,19 ± 16,93	1,39 ± 0,14
EA	224,31 ± 16,69	20,29 ± 5,23	0,20 ± 0,25
EE	106,68 ± 12,51	48,33 ± 1,50	0,63 ± 0,24
MA	117,70 ± 10,94	12,94 ± 2,96	1,12 ± 0,26
ME	47,12 ± 3,69	190,99 ± 14,58	3,08 ± 1,53

*Equivalent acide gallique, **Equivalent quercetine, ***2.2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), IC_{50} concentration efficace (plus IC_{50} est faible, plus l'extrait est anti-oxydant).

CA: Extrait aqueux *Cympopogon citratus*, CE: Extrait éthanolique *C. citratus*, EA: Extrait aqueux *Eucalyptus camaldulensis*, EE: Extrait éthanolique *E. camaldulensis*; MA : Extrait aqueux *Mentha piperita*; ME : Extrait éthanolique *M. piperita*

Le Tab. 3 et la Fig. 1 présentent les résultats des essais termites pour les extraits d'Eucalyptus uniquement, les autres extraits n'ayant qu'une faible activité. Des témoins réalisés avec de l'eau ou de l'éthanol, présentent un taux de survie supérieur à 80%, avec un papier totalement dégradé pour ces mêmes périodes d'exposition. Ceci permet de valider ce test.

Tab. 3 : Activité anti-termite des extraits d'Eucalyptus.

Concentration % (w/w)	2.5			5			10		
	Durée (Jours)	Taux de survie %	SD* (%)	Durée (Jours)	Taux de survie %	SD* (%)	Durée (Jours)	Taux de survie %	SD* (%)
EA	7	75	100	7	96	100	7	83	100
EE	7	58	100	24	0	20	24	0	10

*Surface de papier dégradée ; EA: Extrait aqueux *Eucalyptus camaldulensis*,

EE: Extrait éthanolique *E. camaldulensis*

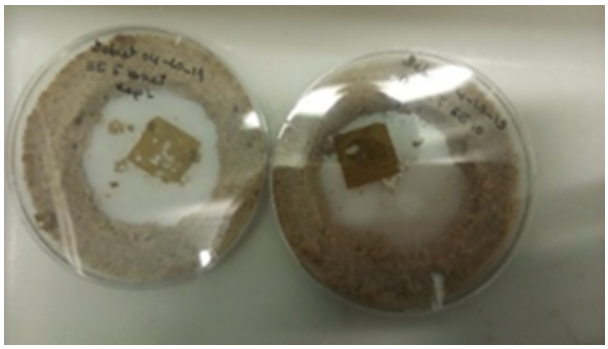


Fig. 1 : Aspect des dispositifs d'essais avec 5% (gauche) et 10% d'extrait éthanolique d'Eucalyptus (droite).

L'activité anti-termite (toxique par ingestion, sans effet répulsif) des extraits d'Eucalyptus est à mettre en relation avec leur teneur en polyphénols et leur activité anti-oxydante. Les flavonoïdes et acides phénoliques sont connus pour leur activité vis-à-vis des termites, mais le spectre de leur activité anti-appétente et/ou toxique dépend de leur structure (Boué et Raina 2003, Ohmura et al. 2000).

Cette étude se poursuit avec l'identification des molécules en jeu dans ces mécanismes biologiques.

Remerciements

Les auteurs remercient l'International Science Programme (ISP) pour le financement du projet BUF 01, ainsi que le CIRAD pour le financement du séjour d'Assétou Sankara à Montpellier.

Références

Boué S.M., Raina A.K. (2003) Effects of plant flavonoids on fecundity, survival, and feeding of the formosan subterranean termite. Journal of chemical ecology, Vol 29, n°11, 2575-2584, doi.org/10.1023/a:1026318203775.

Ohmura W., Dois S., Aoyama M., Ohara S. (2000) Antifeedant activity of flavonoids and related compounds against the subterranean termite *Coptotermes formosanus* Shiraki. Journal of Wood Science, Vol 46, 149-153, doi.org/10.1007/BF00777362.

Sankara A., Ouédraogo J.C.W, Pignolet L., Thévenon M.F., Bonzi-Coulibaly Y. (2020) Chemical profiles and anti-termite activity of hydrodistillation residues from three aromatic plants acclimated in Burkina Faso, Journal of Agricultural Science, Vol 12, n°8, 12 pp, doi:10.5539/jas.v12n8p245.

Sankarikutty B., Narayanan C.S. (2003) Essential oils. Isolation and production, in Encyclopedia of food sciences and nutrition (2nd edition), pp 2185-2189, doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00426-0.

Valorisation des co-produits du bois pour le collage des panneaux de bois

RHAZI Naima[1a,2], OUMAM Mina [1a], SESBOU Abdessadek[3], CHARRIER Bertrand[2], HANNACHE Hassan[1a,b], CHARRIER- ELBOUHTOURY Fatima[2.]

[1a]LIMAT-Equipe Thermo-structuraux des Matériaux et polymères. Faculté des sciences Ben M'sik, Université Hassan II de Casablanca, Boulevard Cdt Driss Harti, BP.7955, Ben M'sik, Casablanca, Maroc;
[1b]: Centre des matériaux avancés, EMINES, Université Polytechnique Mohammed VI, Lot 660 Hay Moulay Rachid, 43150, Ben Guerir, Maroc.
[2]CNRS/UPPA PAU & PAYS ADOUR/ E2S UPPA, Institut des Sciences Analytiques et de Physico-chimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM), IUT des Pays de l'Adour, 371 Rue de Ruisseau, 40004 Mont de Marsan, France.
[3]ENFI-Ecole nationale des ingénieurs forestiers. 511 Salé Tabriquet, BP: 11015, Maroc.
rhazi_naima@hotmail.fr

Mots clés : Ecorces *Acacia Mollissima* ; Tanins ; Lignine ; Adhésifs écologiques

Contexte et objectifs

De nos jours, l'élaboration des colles naturelles alternatives est de plus en plus recherchée pour protéger la santé des utilisateurs et de l'environnement. Généralement les colles utilisées pour le collage des panneaux de bois sont : le phénol-formaldéhyde (PF), l'urée formaldéhyde (UF), la résorcine et la mélanine (Chupin et al. 2015, Moubarik et al. 2010). Ces colles d'origine pétrolière sont appliquées pour le collage des panneaux de bois dans des conditions extrêmes d'humidité et de chaleur. Elles présentent certes une bonne résistance à l'eau, mais émettent un taux de formaldéhyde considérable et d'autres gaz à effet de serre (COV…). Ce travail vise la valorisation des co-produits des écorces de bois (tanin et lignine) pour élaborer une colle biosourcée, qui remplace partiellement ou totalement les colles à base de produits pétroliers. Les écorces utilisées dans cette étude sont celles d'*Acacia mollissima* du Maroc. Le but de cette étude est d'élaborer des colles à faible émission de formaldéhyde et ayant des performances mécaniques proches des colles utilisées dans l'industrie de collage du bois.

Matériel et méthode

Pour chaque coproduit, une étude préliminaire est réalisée pour déterminer les conditions qui permettent d'avoir un meilleur rendement d'extraction du tanin et de la lignine (Rhazi et al. 2015). La quantification des extraits est réalisée par des dosages colorimétriques. L'optimisation des extraits est réalisée selon la méthodologie des plans d'expérience. Pour les formulations de colle, on a remplacé le phénol issu des produits pétroliers par un composant naturel extrait à partir des écorces d'*Acacia Mollissima* du Maroc (les tanins). L'ajout de la lignine dans les formulations de colles phénoliques a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques des colles élaborées (Rhazi et al. 2017).

Une application de collage est destinée aux panneaux de contreplaqués. Leur préparation est réalisée conformément aux exigences de la norme européenne EN 314-1 (2004), et les teneurs en solides des adhésifs ont été déterminées selon la norme EN 827 (2006). La qualité de collage des panneaux de contreplaqués préparés dans le laboratoire est évaluée selon des tests normatifs : test de traction, résistance au cisaillement et évaluation de la rupture cohésive apparente de l'adhésif dans le bois. Les propriétés de collage des colles sont évaluées conformément aux normes européennes EN 314-1 (2004) et EN 314-2 (1993). Pour chaque

test, dix panneaux de contreplaqués sont testés. Après détermination des facteurs qui affectent les performances des colles, une évaluation de l'application de ces plaquettes de contreplaqués en milieu sec, humide et extérieur a été réalisée selon les exigences de la norme européenne EN 314-1 (2004).

Résultats et discussions

Rendement d'extraction des tanins condensés

Plusieurs facteurs ont été étudiés pour améliorer le rendement d'extraction des tanins à partir des écorces d'*Acacia Mollissima* du Maroc, comme l'âge des écorces, le temps d'extraction, la température d'extraction, et aussi la nature du solvant d'extraction. Les résultats d'extraction sont présentés dans Rhazi et al. (2015). La teneur exacte en tanins condensés extraits est évaluée par des dosages colorimétriques spécifiques est exprimée en milligramme équivalent cyanidine par gramme de matière séche (mg eq Cya/ g MS). Le résultat de cette étude est présenté dans le Tab.1.

Les résultats de cette étude ont montré que le choix du solvant d'extraction ainsi que de la méthode d'extraction ont une influence significative sur le rendement des tanins extraits. Dans notre étude, l'acétone présente de meilleurs résultats pour l'extraction des tanins condensés dans le cas d'utilisation d'une infusion à haute température, l'éthanol pour la macération à température ambiante et l'eau pour l'extraction assistée par micro-onde. L'étude préliminaire a aussi montré que la progression du temps d'extraction n'améliore pas significativement la teneur en tanins condensés extraits. Les meilleurs résultats sont obtenus au bout de 2h d'extraction.

Tab. 1 : Comparaison de la teneur du tanin extrait selon la nature du solvant utilisé.

Solvant d'extraction	Tanins condensés : test butanol (mg CYA/g MS)		
	Infusion (inf)	Macération (mac)	Micro-onde (MO)
Méthanol	22,88 ± 0,35	27,96 ± 0,30	19,09 ± 0,21
Eau	26,76 ± 0,30	20,29 ± 0,30	47,64 ± 0,45
Ethanol	30,29 ± 0,36	31,89 ± 0,28	18,50 ± 0,06
Acétate d'éthyle	11,20 ± 0 ,18	6,75 ± 0,14	5,02 ± 0,40
Acétone	46,30 ± 1,63	12,84 ± 0,27	10,15 ± 0,28

Evaluation de la réactivité des tanins extraits

Dans le but d'utiliser les tanins extraits pour élaborer des formulations de colles, une évaluation de leur réactivité avec l'héxamine est réalisée par le test de Stiasny selon le protocole de Yazaki et Collins (1994). Ce nombre détermine la quantité de tanins capables de réagir avec le durcisseur. Il est représenté par le pourcentage de masse du précipité par rapport à la masse sèche de l'échantillon de départ. Les résultats du test de « Stiasny» pour les tanins extraits par différentes méthodes (Tinf; TMac et TMO) sont présenté dans la Fig.1. La réactivité des tanins *d'Acacia Mollissima* du Maroc est également comparée à la réactivité du tanin commercial d'*Acacia (Tcom)*.

Cette étude a montré une bonne réactivité des tanins du Maroc extraits par des méthodes différentes. Toutes les méthodes présentent un nombre de stiasny très proche de 100%. Yazaki et Collins (1994) jugent la qualité des tanins utilisés bonne si le nombre de stiasny est supérieur ou égal à 65%. Donc d'après cette étude, le tanin extrait à partir *d'Acacia Mollissima* du Maroc est très réactif avec le durcisseur et par conséquant peut être utilisé avec succès pour faire des formulations de colles biosourcées.

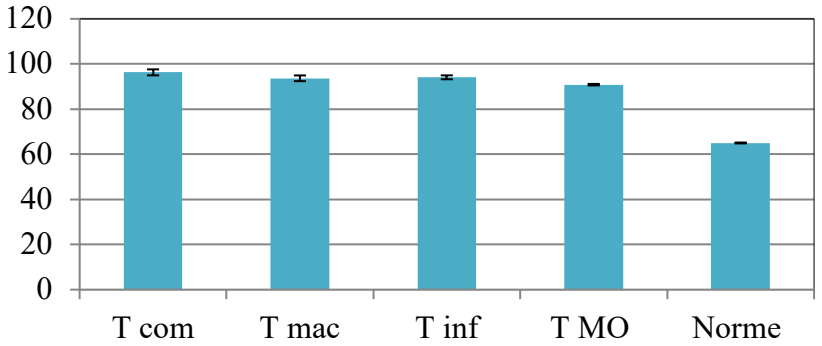


Fig. 1 : Résultats du test de Stiasny pour le tanin extrait d'*Acacia mollissima*.

Préparation des panneaux de contreplaqué

La formulation des colles biosourcées est représenté dans Rhazi et al. (2017). Le résumé du processus d'élaboration des colles est représenté dans la Fig. 2. Après la préparation des plaquettes de bois, elles sont conditionnées une semaine dans une chambre climatique, réglée à température et humidité selon les exigences de la Norme EN 314-2 (1993).

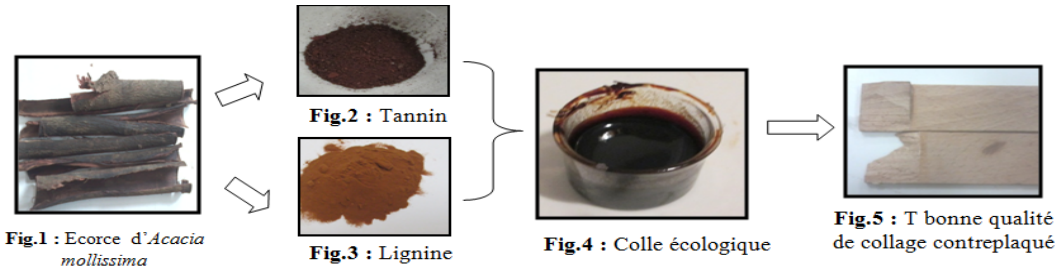


Fig. 2 : Processus de préparation des panneaux de contreplaqués collés avec des colles biosourcées.

Evaluation de la qualité de collage des panneaux

Pour améliorer la performance mécanique des colles biosourcées, différents facteurs sont étudiés comme : le ratio tanin-lignine, le temps de pressage des plaquettes, la température du pressage et la force de presse appliquée. Les résultats de cette étude sont présentés dans la Fig.3.

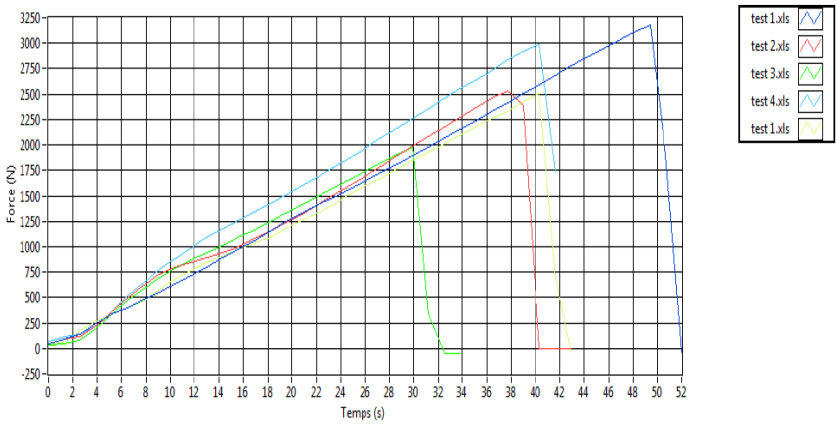


Fig.3 : Test de traction des panneaux de contreplaqués collés avec des colles biosoucées.

Les résultats de cette étude ont montré que les colles biosourcées élaborées à partir de tanin et de lignine présentent de meilleurs performances mécaniques (allant jusqu'à 3000 et 3500 N) et ces résultats dépassent largement les exigences de la norme (Force de rupture > 650 N, EN 314 ; Force de rupture > 1200 N, EN 301 :1992). La meilleure qualité de collage des panneaux

de contreplaqués a été prouvée par différents tests, ce qui encourage leur application dans l'industrie de bois pour des environnements secs.

Conclusion et perspectives

Cette étude nous a permis de confirmer la possibilité de remplacer des formulations phénoliques issues des déchets pétroliers par une source renouvelable. Les formulations des adhésifs écologiques élaborés à partir des écorces d'*Acacia Mollissima* du Maroc présentent de très bonnes performances mécaniques, comparables aux adhésifs de contreplaqués phénol-formaldéhyde disponibles dans le commerce. Ils n'ont pas d'émission de formaldéhyde. Ces formulations de colles pourraient maintenant être testées à une échelle pilote pour fabriquer des panneaux de contreplaqués utilisables en milieu sec, mais également en milieu humide et extérieur.

Remerciements

Nous tenons à remercier le gouvernement Français et Marocain pour leurs soutiens financiers. Et plus spécialement campus France pour programme de post doctorale « Boost Ton Doc » qui offre une opportunité aux chercheurs pour mieux avancer leurs travaux. Nous remercions l'entreprise « Tembec-Rayonier Advanced Materials » pour nous avoir fourni la lignine ainsi que Xylomat, la plateforme technologique de l'équipement d'excellence Xyloforest à Mont de Marsan, pour son accueil, son soutien, la sympathie et la disponibilité de son équipe.

Références

Chupin L., Charrier B., Pizzi A., Perdomo A., Charrier-El Bouhtoury F. (2015) Study of thermal durability properties of tannin–lignosulfonate adhesives. J Therm Anal Calorim (2015) 119:1577–1585.

EN 301 (1992): Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load- bearing timber structure: classification and performance requierements.

EN 314-1. (2004) Plywood: Bond quality. Part 1: test methods.

EN 314-2. (1993) Plywood: Bond quality. Part 2: requirements.

EN 827. (2006) Adhesives: Determination of conventional solids and constant mass solids.

Moubarik A., Allal A., Pizzi A., Charrier F., Charrier B. (2010) Characterization of a formaldehyde-free cornstarch-tannin wood adhesive for interior plywood. Eur. J. Wood Prod. (2010) 68:427–433.

Rhazi N., Oumam M., Sesbou A., Hannache H., Charrier-El Bouhtoury F. (2017) Physico-mechanical properties of plywood bonded with ecological adhesives from Acacia mollissima tannins and lignosulfonates. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 78: 34813. DOI:10.1051/epjap/2017170067

Rhazi N., Oumam M., Hannache H., Sesbou A., Charrier B., Pizzi A., Charrier-El Bouhtoury F. (2015) Comparison of the impact of different extraction methods on polyphenols yields and tannins extracted from Moroccan Acacia mollissima barks. Ind. Crops Prod 70, 245–252.

Reproductibilité des projets architecturaux en bois local dans les territoires vosgiens : édifices exemplaires et modalités de reproduction de l'approvisionnement en grumes et des procédés constructifs

MAZEL Ivan

Unité de recherche Architecture, Environnement et Cultures Constructives (AE&CC), École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG), Université Grenoble Alpes (UGA)
ivan.mazel@grenoble.archi.fr

Mots clefs : projet architectural, bois local, édifice exemplaire, reproductibilité, procédé constructif, Vosges

Contexte et objectifs

Dans la logique de transitions socio-écologiques, le développement d'utilisation des matériaux biosourcés, dont le bois, est un des leviers de transformation des modes de production de la ville et des édifices. Cela d'autant plus qu'aujourd'hui malgré sa croissance, la part de marché du bois dans la construction reste à un niveau faible, il était en 2018 de 6,3 % pour les logements et 16,3 % pour les bâtiments non résidentiels (FBF, CODIFAB, 2019). Par ailleurs, un flux important de bois d'œuvre et d'industrie circule en France entre régions ou depuis et vers l'étranger (Lenglet et al. 2017). Ce constat fonde ce travail de post-doctorat et le programme de recherche HaDEcoT-Bois dans lequel il s'inscrit, programme financé par la région Auvergne-Rhône-Alpes et porté par l'unité de recherche AE&CC, de l'ENSAG et l'UGA en lien avec divers partenaires régionaux de la filière forêt-bois.

Afin de faire face à cette situation, les pouvoirs publics ou parapublics ont mis en place dans le cadre de politiques de démonstration (Labussière 2015) la réalisation d'ensemble d'édifices en bois local, comme le programme des « 100 constructions publiques en bois local » de la Fédération Nationale des Communes Forestières (FN CoFor 2016). La logique est de réaliser avec l'appui de politiques publiques incitatives, des projets dits démonstrateurs ou exemplaires, mettant en œuvre du bois de provenance locale. Ces opérations sont censées créer une demande et ainsi orienter le marché privé vers un développement de l'utilisation des matériaux locaux. Cependant, « l'édifice exemplaire est l'illustration d'un discours dont le statut est toujours incertain. Les doctrines autoritaires s'illustrent d'édifices manifestes. Quand elles emportent pour un temps l'adhésion du public et flattent le goût du commanditaire, l'exemple est reproduit ; l'architecture alors se décline ou se conjugue. Mais l'édifice exemplaire peut rester sans filiation, exemplaire unique d'une doctrine éphémère ou produit d'une circonstance exceptionnelle » (Epron 1989, p. 37). Cette logique d'action publique interroge ainsi la possibilité d'une reproductibilité de pratiques innovantes mises en œuvre dans un seul projet, opération exceptionnelle dans le sens premier du mot, pour leur déploiement dans un ensemble de réalisations architecturales, c'est-à-dire dans le cadre de processus ordinaires et conventionnels de projet. L'objectif de cette communication est ainsi d'explorer les modalités de reproduction de mode de construction d'édifice exemplaire par les acteurs territoriaux et par la même de mettre en évidence les facteurs de reproductibilité des réalisations architecturales en bois local.

Matériel et méthode

Afin d'interroger la reproductibilité des opérations en bois local, nous nous intéressons à des projets architecturaux dans le territoire des Vosges. Le territoire vosgien est en effet le lieu d'une culture de la construction bois révélée par la forte présence de la forêt, l'architecture traditionnelle en bois (Bignon 1983), les stratégies de valorisation du bois local par les pouvoirs publics (association Terres de hêtre, Parc naturel régional des Vosges du Nord) et à proximité l'implantation ancienne d'établissement d'enseignement supérieur sur le bois et la forêt (École nationale du génie rural, des eaux et des forêts à Nancy, École nationale supérieure des technologies et industries du bois à Épinal). Par projets architecturaux, nous faisons référence à des réalisations architecturales comprenant un ou plusieurs édifices, proposant éventuellement des innovations dans les procédés constructifs et de nouvelles organisations des processus de projet.

L'enquête sur la reproductibilité d'utilisation du bois local se base sur un travail de terrain sur des projets architecturaux situés dans le territoire vosgien (Tab. 1). La récolte d'informations se déroule par des entretiens avec les acteurs des projets, par l'observation lors de visite en leur présence ou non des réalisations et la consultation des documents de projets. Une approche croisée de ces différentes sources permet de reconstituer les processus de réalisation afin de mener une analyse comparative des choix effectués dans les processus de projet et des liens entre opérations. De la sorte, on développe dans ce travail une approche sociotechnique en replaçant les techniques de construction en bois comme résultat d'un choix entre différentes options, choix des acteurs territoriaux influencés par leurs représentations socioculturelles et les conditions sociales, politiques et économiques des projets.

Tab. 1 : Cas d'étude de projets architecturaux exemplaires en bois local dans les Vosges

Projets architecturaux exemplaires			Approvisionnement local en grumes	Procédés constructifs (essence)
Noms	Dates	Acteurs moteurs		
Halle couverte	2008	Commune de La Bresse	Forêt communale	Bois rond (épicéa)
Maison de La Bresse	2004-13			Poteau de lamellé-collé (nom essence nd) Panneau de plancher lamellé-croisé (nom essence nd)
Périscolaire	2009-12	Commune de Tendon	Forêt communale	Murs caissons (hêtre) Planchers cloués (épicéa)
Halle	2015			Poteaux et poutres (douglas)
Maison du vélo (Épinal)	2011-15	Communauté d'agglomération d'Épinal	Nd	Poteaux et poutres intérieures en lamellé-collé (hêtre) Poutres (sapin)
Woodies (Xertigny)	2015-16		Nd	Ossature (hêtre)
Atelier bois ONF (Xertigny)	2016		Nd	Poteaux et poutres intérieurs (hêtre) Poutres extérieures (douglas)
Bât'innovant (Preuschdorf)	2012-15	Communauté de communes de Sauer-Pechelbronn	Forêts communales	Poutre (pin sylvestre) Poutres et ossature des murs en lamellé-collé (hêtre)

Premiers résultats et discussion

Les premières analyses de l'utilisation du bois local dans les projets exemplaires, résumées dans le Tab.1, mettent tout d'abord en évidence une reproduction de pratiques d'approvisionnement local en bois provenant de forêts communales. Afin de s'assurer de la provenance des bois différentes formes de marchés publics sont lancés : soit un seul marché public adressé aux entreprises de charpente indiquant que la maitrise d'ouvrage fournira la matière première (Halle couverte), soit plusieurs marchés publics, d'abord pour l'achat du bois, ensuite pour son sciage, ensuite pour sa mise en œuvre (Bât'innovant). Ces deux exemples mettent bien en évidence la difficulté de déployer ces méthodes étant donné que ces opérations représentent des situations singulières où la maitrise d'ouvrage est elle-même propriétaire de forêts. De ce fait ces communes sont généralement engagées pour la valorisation du bois de leurs forêts, volonté difficilement présente dans une maitrise d'ouvrage conventionnelle n'ayant pas la gestion d'une forêt. Cependant, la certification ou labellisation de la provenance des bois permet de prouver sa provenance et ainsi d'assurer sa traçabilité dans les différentes phases de transformation, permettant de la sorte la mise en œuvre de bois local dans un processus de projet conventionnel (Lenglet 2018).

Ce travail d'analyse montre également une certaine reproduction dans les procédés constructifs à partir de différentes essences locales. Différents projets architecturaux sont le lieu d'une mise en œuvre du hêtre suivant différents systèmes constructifs : poteaux et poutres en bois massif, ossature composée de pièces massives et de panneaux d'industrie d'autres essences, structure en lamellé-collé (Périscolaire, Woodies, Maison du vélo, Atelier bois ONF, Bât'innovant). Ces projets ont été accompagnés et soutenus par l'association Terres de hêtre, crée par les pouvoirs publics du territoire d'Épinal, mais très peu de projets privés employant cette essence ont émergé. La démarche de valorisation du hêtre se révèle difficile, d'une part, parce que sa mise en œuvre sans traitement n'est possible qu'en intérieur, et d'autre part, parce que la production du lamellé-collé à partir de cette essence est notablement plus difficile qu'avec le résineux. Plus largement la production de lamellé-collé en bois local à partir du hêtre, a suscité peu d'intérêt des entreprises, du fait d'un marché de la construction quasi inexistant sur ce créneau. Dans le même sens, des procédés constructifs pourtant simples et ingénieux comme la structure en bois rond n'ont pas été reproduits (Halle couverte). L'utilisation de bois de provenance locale a souvent été permise dans ces opérations par la forte implication de la maitrise d'œuvre, architecte et ingénieur, pour l'usage de matériaux biosourcés de proximité. La reproduction de cette utilisation de bois local dépend ainsi généralement de l'engagement de la maitrise d'œuvre.

Même si ponctuellement des projets privés reprennent une partie des procédés constructifs de ces projets publics, nous constatons peu de reproduction de ces édifices exemplaires. Néanmoins, l'utilisation du bois local reste largement présente dans des pratiques de construction traditionnelle des maisons en colombages composées d'une structure en bois avec un remplissage des murs en pierre, terre ou brique. Depuis plusieurs siècles, à chaque cycle de réhabilitation, le démontage et le remontage des maisons est reproduits en réemployant les pans de bois et éventuellement en les remplaçants par des éléments de bois massif de provenance locale. Par ailleurs, d'autres projets émergents tendent à montrer que la simplicité constructive est un levier pour l'utilisation du bois local. Dans le projet Üte, la gamme de petit habitat allant de l'abri à vélo à l'habitat léger de loisir, est conçue par une collaboration architectes-scieur-chargé du développement économique et se base sur des procédés constructifs simples en bois massif et de provenance locale (Soller construction bois et al. 2020). Ce projet devant être lancé en octobre 2020, une analyse de son développement après son lancement sera néanmoins nécessaire.

Conclusion et perspectives

Ces premières analyses mettent en évidence la difficile reproduction des édifices exemplaires en bois local, la construction de projets architecturaux se limitant généralement dans les Vosges à un prototype servant de références à quelques réalisations. La reproductibilité d'une architecture en bois reste faible, ce qui amène à ne pas négliger les freins opérant sur l'utilisation du bois local dans la construction.

Ainsi au-delà d'une analyse des modalités internes des processus de projets, interroger la reproductibilité des opérations utilisant du bois local nécessite d'explorer les conditions sociales, c'est-à-dire à la fois culturelles, politiques et économiques, qui déterminent les choix constructifs et d'approvisionnement en matériaux et éléments de construction. En effet, dans le cadre des transitions socio-écologiques, l'enjeu est une transformation de la production urbaine et du bâtiment afin de faire passer les modes de construction géosourcés et biosourcés des niches de marché, à des transformations territoriales des systèmes sociotechniques régissant les modes de constructions (Boulanger 2015).

Références

Bignon J.-C. (dir.) (1983) Le bois dans l'architecture du massif vosgien, Villers-lès-Nancy, École d'architecture de Nancy, CAUE des Vosges, 47 p.

Boulanger P.-M. (2015) Transition (point de vue 2), in Bourg et Papaux (dir.), Dictionnaire de la pensée écologique, Presses universitaires de France, p. 1930 1938.

Épron J.-P. (dir.) (1989) Architecture et constructeurs. Anthologie 1, Références pour l'architecture, images de l'architecte, Paris, Institut français d'architecture, 150 p.

FN CoFor (2016) 100 constructions publiques en bois local, http://www.100constructionsbois.com/, consulté le 30/09/2020.

FBF, CODIFAB (2019) Enquête nationale de la construction bois. Paris, France Bois Forêt (FBF) interprofession nationale, Comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois (CODIFAB), 8 p, https://www.codifab.fr/sites/default/files/enquete_constructionbois_juin_2019.pdf, consulté le 26/10/2020

Labussière O. (2015) La performance énergétique des bâtiments à l'ère des politiques européennes de démonstration. Le cas du programme CONCERTO et du projet de la ZAC De Bonne (Grenoble, France), VertigO, Vol 14 (3), 74 §, http://journals.openedition.org/vertigo/15671, consulté le 26/10/2020.

Lenglet J. (2018) Les labels pour le bois local sont-il efficaces ? Forestopic, https://www.forestopic.com/fr/agora/points-vue/845-labels-bois-local-efficaces, consulté le 30/09/2020.

Lenglet J., Courtonne J.-Y., Caurla S. (2017) Material flow analysis of the forest-wood supply chain: A consequential approach for log export policies in France, Journal of Cleaner Production, vol. 165, p. 1296-1305.

Soller construction bois, Agence JCBA et Atelier Lien d'Horizon (2020) Üte nano-habitat, https://www.facebook.com/UTENANOHABITAT, consulté le 26/10/2020.

Fluage des structures mixtes : applications aux ponts Bois / Béton colles

QUINTERO Christian, SAUVAT Nicolas, DUBOIS, Fréderic, MILLEN Anne

GC2D, Univ. Limoges, Egletons
christian.quintero-reyes@etu.unilim.fr

Mots clefs : Viscoélasticité ; Comportement différé ; Structures mixtes ; Bois – Béton ; Pont

Introduction et contexte

La majeure partie des ponts de faible portée (inférieure à 25 m) est gérée par des collectivités territoriales. Nombre de ces ouvrages construits en maçonnerie ou en béton présentent des pathologies et leur remplacement apparaît parfois comme inévitable. Des solutions mixtes bois-béton ont déjà été mises en œuvre, avec des connexions mécaniques (Pont du Riou ou de Lure). Une liaison collée par époxy permettrait de profiter au mieux de la mixité des matériaux (Loulou 2013). Mais le comportement au fluage des matériaux constitutifs étant différent, il convient dans un premier temps d'évaluer la possible perturbation au cours du temps de l'équilibre des contraintes dans la section.

Nous présentons ici un cas d'étude de prédimensionnement (CEREMA 2020). Des lois de fluage simples et règlementaires sont appliquées pour une simulation sur 100 ans. La flèche centrale et la distribution des contraintes normales dans la section sont étudiées.

Cas d'étude

Prédimensionnement

A la demande du Conseil département de Haute Saône, le remplacement du pont de Tillouzot sur la Grosne, à Massilly, a été étudié avec une version bois béton collée (Fig. 1).

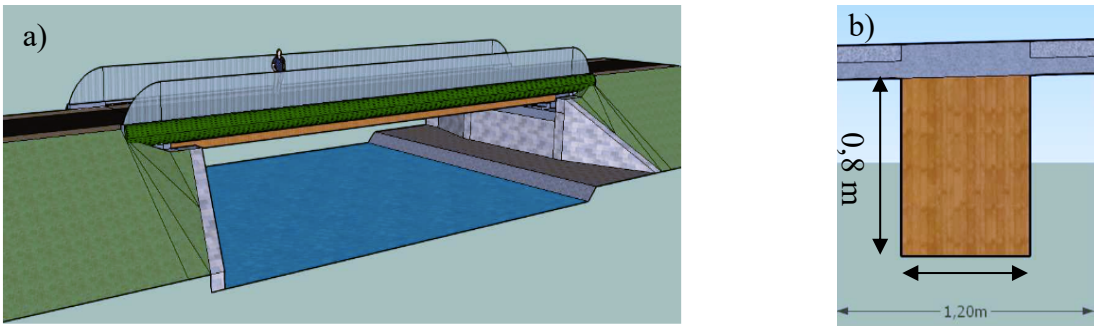


Fig. 1 : Pont de Tillouzot : a)Vue d'ensemble , b) Section sur une nervure

L'ouvrage présente une portée de 21 m. Il est supporté par 4 poutres en bois lamellé. Ces poutres sont reconstituées par collage sur la hauteur de 3 éléments de 0,2 m de large. La largeur de la nervure est donc de 0,60 m, pour une hauteur de 0,80 m. Le tablier en béton-armé a une épaisseur de 0,20 m.

Propriétés des matériaux.

Les poutres sont en Douglas GL24h. Le béton du tablier est en classe C35/45, avec un module d'élasticité 34 000 MPa, résistance caractéristique a la compression.

Charges

Cet ouvrage étant sur une piste cyclable, seules les charges de poids propres sont retenues dans cette modélisation. Elles génèrent une charge linéique pondérée (ELU $\gamma_G = 1{,}35$) de 9,4 KN/m.

Modèle

Maillage et conditions limites

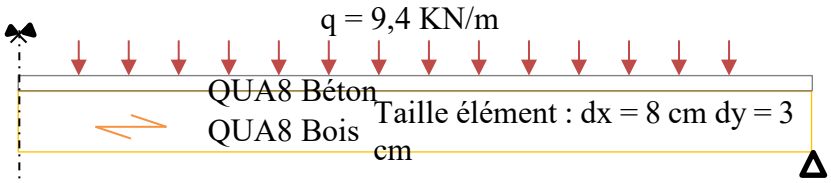


Fig. 2 : Maillage, conditions limites et force appliquée

Le maillage (Fig. 2) est constitué de 4128 éléments de type QUA8 dont 3354 éléments (jaunes) sont du bois et 774 éléments (noirs) du béton. Le pont est modélisé comme une poutre bi appuyée. Le maillage correspond à la demi-portée.

Lois de comportement en fluage

Les Eurocodes proposent une prise en compte du fluage par un coefficient multiplicateur du déplacement instantané. Pour les structures en bois, l'Eurocode 5 (NF EN 1995-2 2005) propose le coefficient k_{def}, dépendant de la classe de service. Le comportement différé peut être exprimé par un modèle de Kelvin-Voigt généralisé (Dubois 1997). Un coefficient a_{cls} peut être ajouté comme un accélérateur du fluage pour couvrir les 3 classes de service (Eq. 1), J (t) est la fonction de fluage, E_0 représente le comportement élastique instantané du système. A_i et λ_i représentent la raideur et la viscosité de la i^{ieme} cellule de Kelvin Voigt. Les valeurs obtenues de a_{cls} pour les classes de service 1, 2 et 3, CS1, CS2 et CS3, sont respectivement 0,133, 1 et 1000, pour un k_{def} à 50 ans de 0,6, 0,8 et 2.

$$J(t) = \frac{1}{E_0} \cdot \left[1 + \sum_{1=1}^{8} A_i \cdot \left(1 - e^{-\lambda_i \cdot a_{cls} \cdot t}\right)\right] \quad (1)$$

La loi de fluage du béton est celle proposée dans l'Eurocode 2, section 3.1.4. Cette loi est impactée par l'humidité relative extérieure ; deux cas sont retenus ici : HR = 70% et HR = 80%. Les lois de fluage sont illustrées Fig. 3.

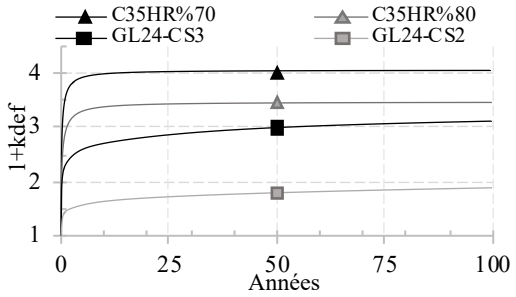


Fig. 3 : Coefficient multiplicateur de déplacement instantané

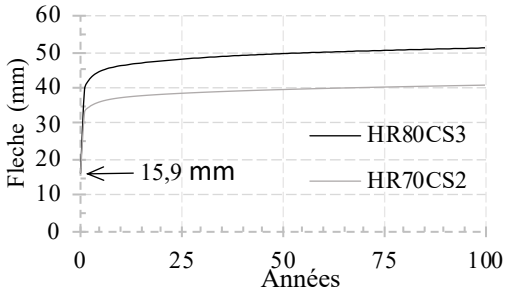


Fig. 4 : Flèche maximale de la nervure

Si le bois flue plus dans une ambiance humide, le béton au contraire est plus sensible à une ambiance plus sèche. L'équilibre hydrique du bois des conditions extérieures nous conduit à un équilibre interne pouvant aller de la CS2 à la CS3. Nous retenons 2 cas dans ce résumé :

• Cas 1 : Bois en CS2 et fluage béton calculé pour HR = 70%,

• Cas 2 : Bois en CS3 et fluage béton calculé pour HR = 80%,

Résultats

Flèche

Comme illustrée à la Fig. 4, le cas 2 conduit à une flèche finale est 51 mm à 100 ans, soit un rapport à la portée de L / 410. Pour le cas 1, la flèche finale de 40 mm donne un rapport de 525.

Profils des contraintes

Les profils de contraintes normales σ_{XX} sur la hauteur de la section sont présentés Fig. 5 et Fig. 6 pour les 10 premières années. Les valeurs maximales sont inférieures aux résistances pour un calcul instantané. Les variations les plus importantes apparaissent dans la première année de vie de l'ouvrage. Ensuite le comportement se stabilise et n'évolue quasiment plus. Le fonctionnement de la section mixte est donc en sécurité car le béton reste toujours en compression.

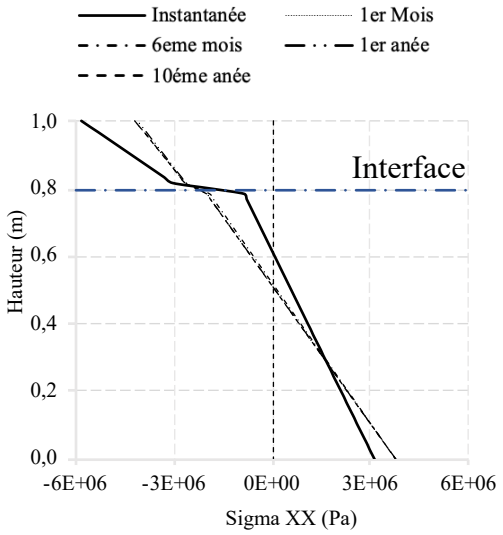


Fig. 5 : Contraintes normales à la classe de service 2 HR 70%

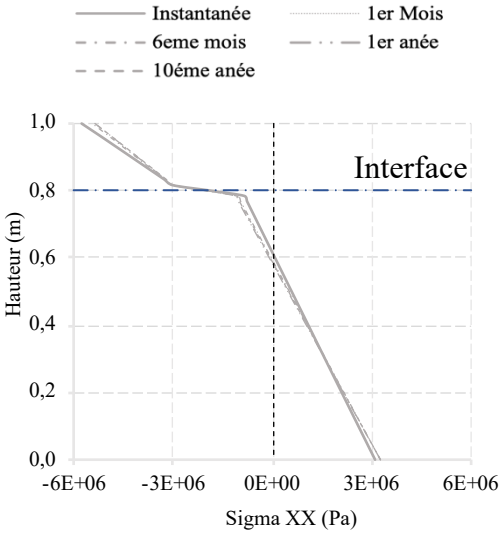


Fig. 6 : Contraintes normales à la classe de service 3 HR 80%

Cinétique de la poutre

Le fluage différentiel des matériaux béton et bois est donc uniquement visible dans les premières années de fonctionnement de l'ouvrage. La Fig. 7 représente l'évolution de l'axe neutre sur la hauteur. Seul un léger rapprochement de l'interface est visible dans les premiers mois du cas 2. Cette évolution peut être anticipée par une représentation du ratio des lois de fluage des deux matériaux comme proposé en Fig. 8.

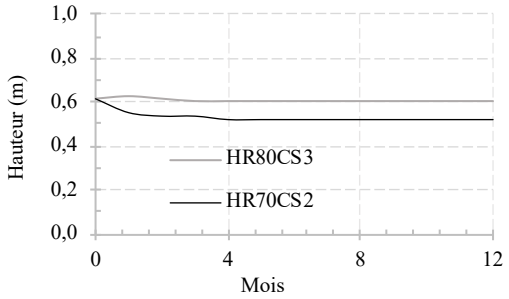


Fig. 7 : Evolution de la position de l'axe neutre dans la première année

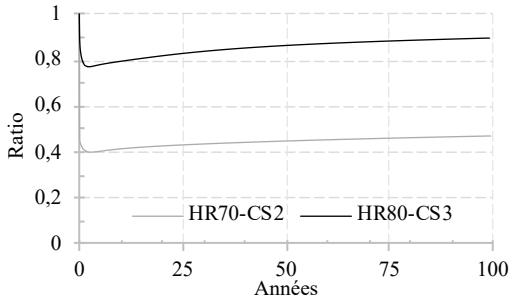


Fig. 8 : Ratio des coefficient multiplicateur de déplacement instantané du bois divisé par celui du béton

Conclusions et perspectives

L'application des lois de fluage régulières et règlementaires, c'est-à-dire non dépendantes de la température et de l'humidité, à des structures mixtes ne fait pas apparaître de modification notable de la distribution des contraintes au cours du temps. Cependant, le modèle reste largement perfectible par la détermination des profils réels de température et d'humidité dans les matériaux (Varnier 2019), et l'introduction de lois de fluage dépendantes de l'humidité et/ou de la température. Enfin, l'introduction d'éléments de joints pour modéliser l'interface collé permettra d'inclure un caractère endommageable de la liaison. En effet les variations dimensionnelles différentielles liées aux variations de température et d'humidité sont susceptibles de générer un phénomène de fatigue hydrique tendant à diminuer la qualité de la liaison dans le temps.

Remerciements

Le financement de ce doctorat est assuré par une bourse de la région Nouvelle Aquitaine. L'application au pont de Tillouzot est faite en partenariat avec le LABOMAP et le CEREMA.

Références

CEREMA (2020) Étude des scénarios de réparation du tablier de l'ouvrage vs démolition / Reconstruction par un pont mixte bois-béton à interface collé.

Dubois F. (1997) Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissures, Université Limoges

Loulou L. (2013) Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique, Doctorat Université Paris-Est (direction de thèse : laboratoire Navier).

NF EN 1995-2 (2005) Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois partie 2 : Ponts Annexe nationale.

Varnier M. (2019) Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus, Université Limoges.

Valorisation des extractibles présents dans les écorces d'essences du Nord-Est de la France

FRITSCH Clément[1], BRENNAN Maree[1], COSGUN Sylvain[1], DUMARCAY Stéphane[1], COLIN Francis[2], GERARDIN Philippe[1]

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Nancy
[2] INRAE, AgroParisTech, Université de Lorraine, SILVA, Nancy
clement.fritsch@univ-lorraine.fr

Mots-clés : valorisation, bois, connexes, écorces, chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse, analyse chimique, variabilité, polyphénols

Contexte et objectifs :

L'industrialisation du bois engendre aujourd'hui de grosses quantités de connexes notamment des écorces. Elles sont utilisées principalement pour des applications en horticulture ou pour de l'énergie. L'un des objectifs de ce travail est d'apporter une plus-value aux écorces en étudiant les polyphénols présents dans ces dernières, ce qui permettrait leurs utilisations dans plusieurs domaines comme l'agroalimentaire, la cosmétique, l'agrochimie ou encore la pharmaceutique. Pour se faire, il est essentiel de mieux connaître la ressource, notamment sa disponibilité, mais aussi sa composition chimique, aussi bien d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

Matériel et méthode

Les écorces de 5 essences sont étudiées, à savoir le sapin (*Abies alba*), l'épicéa (*Picea abies*), le douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le chêne (*Quercus robur*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*). Pour chaque essence, 8 arbres sont sélectionnés dont 4 correspondants à une sylviculture dynamique (DYN) avec différentes éclaircies et 4 à une sylviculture témoin (TEM) sans intervention humaine. Pour chaque arbre, 11 à 13 échantillons d'écorce sont sélectionnés. Ces échantillons sont broyés avec une granulométrie maximale de 0,4 mm et sont extraits (grâce à l'ASE signifiant « Accelerated Solvant Extraction ») avec un mélange eau/éthanol (50/50, v/v) et le taux d'extrait est calculé (grâce au rapport gravimétrique entre l'écorce avant extraction et après extraction) après évaporation de l'éthanol et lyophilisation de la phase aqueuse résiduelle. En parallèle, les extraits prélevés à 3 hauteurs différentes, à savoir à 1m30 du sol (L3), à la base du houppier (L6) et où le tronc à un diamètre de 10 cm (L10) ont été analysés par LC-UV-MS. La chromatographie liquide (LC) permet à la fois d'identifier les extractibles grâce à la spectrométrie de masse (MS) et de les quantifier grâce à l'absorption aux rayons ultra-violet (UV) à 280 nm (il s'agit de la longueur d'onde optimale d'absorption pour les extractibles de type polyphénols) (Fig. 1).

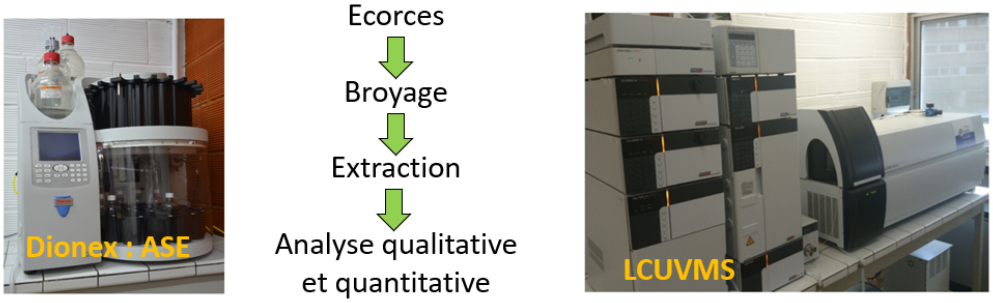


Fig. 1 : Processus d'extraction et d'analyse des écorces

D'autres méthodes analytiques complémentaires comme les spectroscopies à résonance magnétique nucléaire (RMN) du proton et infra-rouge (IR) ou encore la chromatographique à exclusion stérique (SEC) sont également envisagées afin d'apporter des informations supplémentaires de la composition des écorces.

Résultats

Pour les extractions, nous avons obtenu un rendement en extractibles pour chaque hauteur analysée. Les résultats pour les essences résineuses sont présentés en Fig. 2.

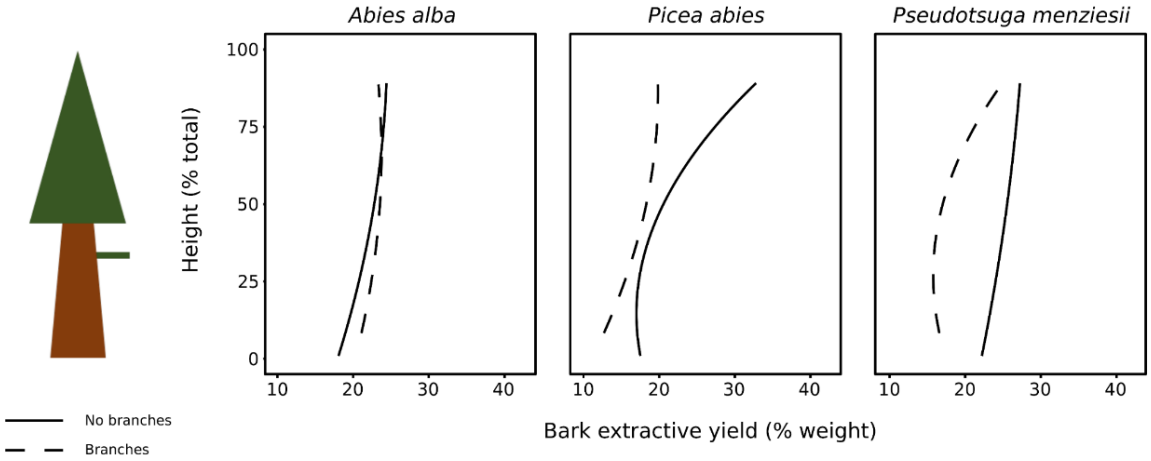


Fig. 2 : Evolution de la teneur en extractibles obtenue après l'extraction de l'écorce pour 3 espèces différentes en fonction de la hauteur de prélèvement de l'écorce

Concernant les identifications des extractibles, l'ensemble des essences a été analysé par chromatographie liquide couplée à de la spectroscopie UV et de la spectrométrie de masse (plusieurs essences d'arbres ont été étudiées et le douglas est présenté ici en raison son cas particulier qu'est la présence de taxifoline dans ses écorces) (Fig. 3).

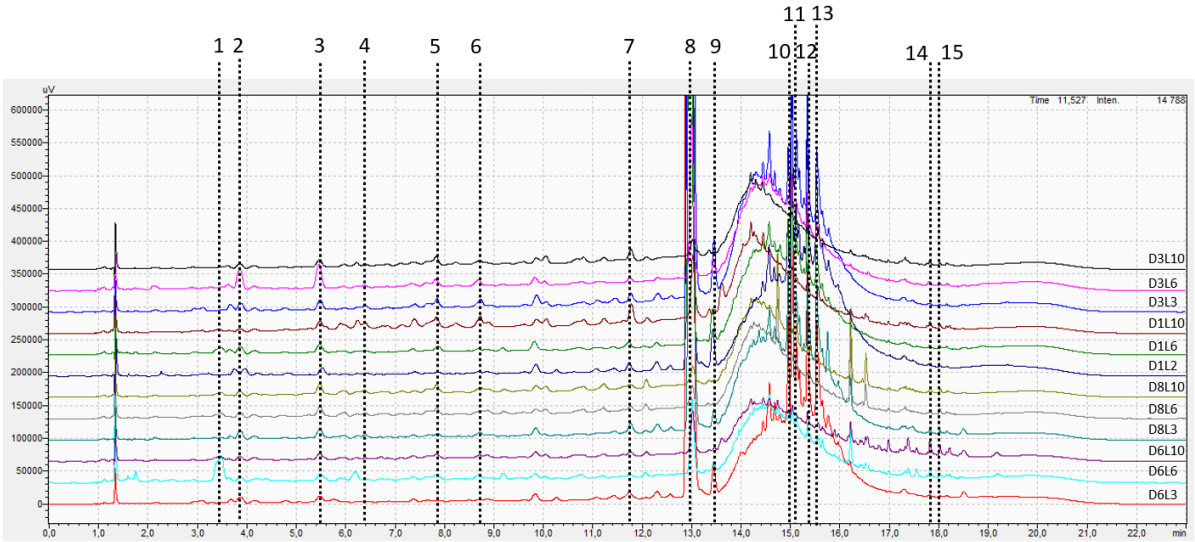


Fig. 3 : Chromatogrammes d'écorces de douglas prélevées à différentes hauteurs dans différents arbres : L3 (1m30 du sol), L6 (base du houppier), L10 (diamètre de tronc de 10cm)

L'identification des différents constituants présents dans les écorces de douglas a été réalisé grâce à la spectrométrie de masse et par recoupement avec des données de la littérature [1] ainsi que l'utilisation de différents standards tel que la catéchine, l'épicatéchine, l'acide protocatéchique et la taxifoline (Tab. 1).

Tab. 1 : Identification des pics identifiés pour les écorces de douglas

Pic	Composé	RT moyen	λ max (nm)	Masse molaire
1	Syringaldéhyde	3.51	220,281	182
2	Acide protocatéchique	3.88	259,291	154
3	Aldéhyde protocatéchique	5.5	276	138
4	Catéchine	6.33	277	290
5	Non déterminé	7.85	278	284/418/578
6	Epicatéchine	8.77	279	290
7	Taxifoline hexoside	11.69	281	466
8	Taxifoline	13	287	304
9	Isomère de taxifoline/ +additif inconnu	13.5	281	304/548,5
10	Eriodictyol	14.95	278	288
11	Lutéoline + Quercétine	15.1	287	286/302
12	5-[6-(3-hydroxy-4-methoxyphenyl)-1,3,3a,4,6,6a-hexahydrofuro[3,4-c]furan-3-yl]-2-methoxyphenol	15.42	281	358
13	Non déterminé	15.61	288	272/660/546/604
14	Isorhamnetine-3-O-glucuronide glucoside	17.91	291	654
15	Non déterminé	18.08	250,298	Non déterminé

Un aspect peu étudié dans la littérature concerne la variabilité de la teneur des extractibles en fonction de la hauteur de prélèvement, c'est pourquoi plusieurs hauteurs sont étudiées dans ce travail. La variabilité de la taxifoline dans le douglas est présentée en Fig. 4.

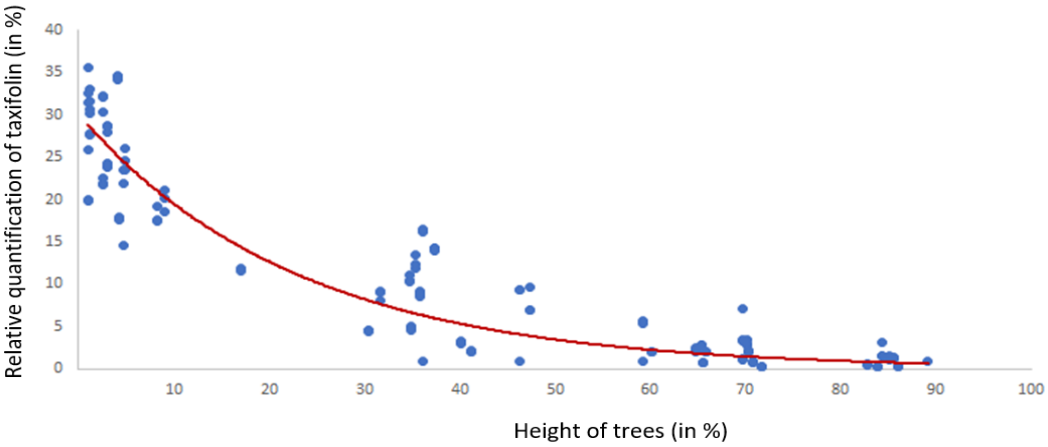


Fig. 4 : Variation de la taxifoline dans le douglas en fonction de la hauteur de l'arbre

Discussion et perspectives

Dans un premier temps, il est observé une augmentation du taux d'extrait avec la hauteur dans l'arbre. En effet, pour les écorces de sapin, le taux d'extrait passe de 18% (à 1m30) à 25% (à 10 cm de diamètre du tronc), pour les écorces d'épicéa de 18% à 34% et enfin pour les écorces de douglas de 22% à 27% (Fig. 1). La raison de cette variation du taux d'extrait avec la hauteur de l'arbre semble être liée à l'âge des tissus constitutifs de l'écorce, les tissus jeunes renfermant plus de sucres que les tissus plus âgés comme cela a pu être démontré par RMN [2]. Par ailleurs, il est possible que des molécules phénoliques présentes dans les extraits s'oxydent au cours du temps (en raison d'un lapse de temps plus ou moins conséquent entre la préparation de

l'échantillon et son passage en chromatographie liquide), pouvant ainsi altérer les quantifications du fait de l'obtention de composés insolubles qui ne sont plus pris en compte dans le taux d'extrait calculé par chromatographie liquide.

Lorsque l'on compare la nature des produits identifiés à différentes hauteurs des différents douglas (Fig. 2), on s'aperçoit qu'il n'y a pas de différences majeures d'un point de vue de la nature chimique des molécules présentes. Les chromatogrammes sont très similaires, avec des pics apparaissant aux mêmes temps de rétention, présentant des mêmes spectres de masse et des intensités relativement proches (sauf exception, comme la taxifoline), caractéristiques d'une composition chimique assez similaire. Certains produits semblent toutefois être présents en quantités plus ou moins importantes en fonction de la hauteur étudiée. C'est le cas par exemple de la taxifoline. On s'aperçoit effectivement qu'il y a une différence à 1m30 où le taux est de 30% et là où le diamètre du tronc est à 10 cm, où la taxifoline avoisine les 2% (Fig. 4). Dans tous les cas les produits identifiés appartiennent principalement à la famille des flavonoïdes pouvant être présents sous forme libre ou glycosylée, des lignanes et autres acides phénoliques (Fig. 5). En plus de ces produits, les analyses indiquent la présence d'un ou plusieurs massifs mal résolus correspondant aux tannins, et ce, quelle que soit l'essence étudiée.

Concernant les comparaisons interspécifiques entre toutes les essences étudiées, on retrouve également de même type d'extractibles à savoir des lignanes, acides phénoliques, tanins, flavonoïdes ou encore des stilbènes.

Fig. 5 : Exemples du type d'extractibles retrouvés dans les écorces

En conclusion, la valorisation des extractibles provenant des écorces est un sujet de recherche d'intérêt. Malgré la possibilité d'identifier, grâce à la chromatographie liquide, les extractibles de types polyphénols constituants les écorces, il semble difficile de purifier un composé précis en raison de la complexité de de la composition des mélanges. L'idée de valoriser des mélanges de polyphénols, dont on pourrait identifier et quantifier la composition, semble davantage plausible comparée à une purification onéreuse et difficile de molécules cibles.

Remerciements

Cette étude fait partie du projet ExtraForest, soutenu par le Ministère français de l'Agriculture, le Lorraine-FEDER, l'ADEME et la Région Grand-Est.

Bibliographie

Bianchi S. (2016) Extraction and characterization of bark tannins from domestic softwood species, PhD, https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/7058/1/Dissertation.pdf

Brennan M., Fritsch C., Cosgun, S. Dumarcay S., Colin F., Gérardin, P. (2020) Quantitative and qualitative composition of bark polyphenols changes longitudinally with bark maturity in Abies alba Mill. Annals of Forest Science 77(1). https://doi.org/10.1007/s13595-019-0916-x.

Comprendre les spécificités physiques et vibro-mécaniques des Palissandres, bois du genre pantropical menacé *Dalbergia*

SUAREZ DIAZ Sebastian[1], GUIBAL Daniel[2], CABROLIER Pierre[3], THEVENON Marie-France[2], LANGBOUR Patrick[2], BREMAUD Iris[1]

[1]Equipe BOIS, LMGC, UMR5508, CNRS, Univ. Montpellier, 34090 Montpellier
[2]BioWooEB, CIRAD, 34090 Montpellier
[3]Artisan/chercheur indépendant, 30460 Colognac
sebastian.suarezdiaz@agroparistech.fr

Mots clefs : Palissandres ; *Dalbergia* ; CITES ; bois ; usages ; colorimétrie ; propriétés vibro-mécaniques ; artisanat ; bois précieux ; chémo-taxonomie.

Introduction

Le genre pantropical *Dalbergia* de la famille des Fabaceae (sous-famille Papilionoideae) comprend environ 250 espèces, parmi lesquelles de nombreuses sont emblématiques par la qualité et la haute valeur économique de leurs bois (Klitgaard et al. 1999, Richter et al. 1996). Communément appelés « Palissandres », leurs bois ont été catalogués comme « bois précieux », grâce à leurs propriétés physico-mécaniques et acoustiques, de durabilité, d'ouvrabilité, ainsi que de caractéristiques macroscopiques comme la couleur, la texture et le grain, leur conférant une valeur esthétique élevée et désirable (Cervantes et al. 2019). Les bois de Palissandres représentent une importante diversité d'usages culturels. Les principaux usages sont répertoriés en ameublement et ébénisterie de luxe, fabrication d'artisanats et d'outils, sculpture, construction, et fabrication de différents instruments de musique (tels que les guitares, les marimbas, les xylophones, les clarinettes, les hautbois et cornemuses, etc) (Richter et al. 1996, Ramananantoadro et al. 2013, Espinoza et al. 2015). Depuis environ trois siècles en général (deux millénaires au moins pour le *D. melanoxylon*), les bois de Palissandres font l'objet de marchés locaux et internationaux. Cependant dans les dernières décennies, les populations de *Dalbergia* ont été de plus en plus surexploitées, principalement à cause de l'expansion du marché chinois, notamment pour la production de meubles haut de gamme « hongmu » (EIA 2016). Les populations naturelles de *Dalbergia* ont considérablement diminué, et leurs habitats naturels sont fragmentés (Cervantes *et al.,* 2019). De plus, même si toutes les espèces du genre *Dalbergia* ne sont pas également menacées, elles sont très difficiles à identifier entre elles sur des bases d'anatomie des bois. Pour ces raisons, l'ensemble du genre est inscrit dans les annexes de la convention CITES (Convention sur le commerce international des espèces de faune et flore sauvages menacées d'extinction) en limitant drastiquement leur commercialisation (CITES 2016). Cette situation met en évidence la nécessité de trouver des essences avec des propriétés similaires (Ramananantoadro et al. 2013). Cependant, malgré la large utilisation et la réputation des Palissandres, il existe peu d'études de caractérisation des propriétés physiques, mécaniques et vibratoires de leur bois : sur environ 250 espèces de *Dalbergia*, les propriétés vibratoires n'ont été publiées que pour 12 essences seulement (Brémaud 2009). Ces données, quoiqu'encore éparses, suggèrent un comportement atypique du bois de *Dalbergia* en comparaison avec la diversité connue sur 450 espèces de bois (toutes familles et origines confondues) : les Palissandres semblent caractérisés par des coefficients d'amortissements très faibles (Brémaud 2009, Brémaud 2012), que l'on retrouve difficilement, entre 20 familles botaniques ; sauf dans les Fabaceae et notamment la sous-famille des Papilionoideae (Brémaud et al. 2009). Cette caractéristique vibro-mécanique pourrait venir d'une composition

particulière en extractibles, comme cela a été trouvé sur 2 espèces de *Dalbergia* et sur des genres proches comme *Pterocarpus* (Brémaud et al. 2011) qui appartiennent également à la tribu des Dalbergieae (Klitgaard et al. 1999).

L'objectif de ce travail était de contribuer à comprendre ce qui fait la spécificité des bois du genre *Dalbergia,* en caractérisant des propriétés physiques et vibro-mécaniques de nombreuses espèces de *Dalbergia,* afin de tester l'hypothèse que ces bois ont, à l'échelle du genre, des propriétés atypiques par rapport à la diversité globale des bois.

Matériel et méthodes

Deux sources d'échantillons ont été utilisées. La première source correspond à 168 plaquettes de bois du genre *Dalbergia*, couvrant 44 espèces identifiées plus 16 *Dalbergia* spp, de la xylothèque de l'unité de recherche BioWooEB du CIRAD à Montpellier. Ces plaquettes ne peuvent être étudiées que par des méthodes strictement non-invasives. Les dimensions sont 130×60×10mm^3 (L×section transverse variable). La plupart des échantillons correspondaient au duramen, mais les mesures ont été aussi prises pour des plaquettes d'aubier. La deuxième source correspond à 214 lamelles de bois de duramen collectées auprès de luthiers. La moitié des spécimens sont du genre *Dalbergia*, d'au moins 8 espèces (identification à venir). L'autre moitié correspond à différentes espèces (au moins 30) employées par des luthiers en guitares (surtout pour des fonds mais aussi tables). Les dimensions des lamelles sont : 150×12×2 mm^3 (L×R×T ou L×T×R). Les échantillons ont été stabilisés pendant 3 semaines à température 20±2°C et à humidité relative de 65±5%.

La densité a été calculée par le rapport entre la masse (g) et le volume (cm^3). Les paramètres colorimétriques ont été mesurées avec un colorimètre Datacolor 400, diamètre d'observation 9 mm, et l'illuminant D65 10°. Les variables obtenues sont : L (luminosité), a*(axe vert-rouge), b* (axe bleu-jaune), C* (saturation) et h (angle de teinte). Les propriétés vibratoires, soit le module d'élasticité spécifique (E/ρ) et le coefficient d'amortissement (tanδ), ont été déterminées à partir de deux méthodes non destructives différentes, selon la source des échantillons. La méthode Bing®, en vibration naturelles, peut s'adapter à des géométries différentes et a été utilisée pour les plaquettes de la xylothèque. La méthode Vybris (Brémaud 2012), en vibrations forcées sans contact, est très précise pour l'amortissement mais demande le débit de lamelles de géométrie précise, elle a été utilisée pour les bois fournis par des luthiers.

Résultats et discussion

Les propriétés physiques moyennes sur l'ensemble des espèces testées sont présentées dans le Tab. 1. Les *Dalbergia* sont classées comme des bois « très lourd » et « lourd » avec une densité supérieure à 0,8 g/cm^3. L'aubier et le duramen sont bien différenciés avec notamment une clarté et un angle de teinte très supérieurs dans l'aubier.

Tab. 1 : Valeurs de colorimétrie et densité pour l'ensemble des espèces de Dalbergia étudiées

	L		a*		b*		C*		h		D (g/cm3)	
Dalbergia	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Aubier	68.84	5.88	9.06	2.06	29.06	3.67	30.50	3.77	72.97	2.97	0,794	0,150
Duramen	39.52	9.81	10.78	5.01	13.28	7.76	17.23	8.99	48.04	7.68	0,981	0,179

Le module spécifique moyen de toutes les espèces de *Dalbergia* testées est 19 GPa. Le coefficient d'amortissement (tanδ) moyen est 0,006 dans le duramen et 0,010 dans l'aubier. La Fig. 1 montre la relation entre les deux variables pour 450 espèces (données Brémaud 2012) et pour les *Dalbergia* étudiées par les deux méthodes. Les résultats obtenus montrent que les nombreuses espèces (30+8 spp. identifiées, plus 16 non identifiées) de *Dalbergia* étudiées sont

en dessous de la relation standard, avec des valeurs faibles voire très faibles de coefficient d'amortissement alors que ces bois ont une rigidité faible à moyenne. Ces résultats valident donc l'hypothèse qu'un amortissement (très) faible constitue une spécificité du genre *Dalbergia*, hypothèse jusqu'ici formulée sur des données connues sur seulement 12 espèces (Brémaud 2009, Brémaud et al. 2009).

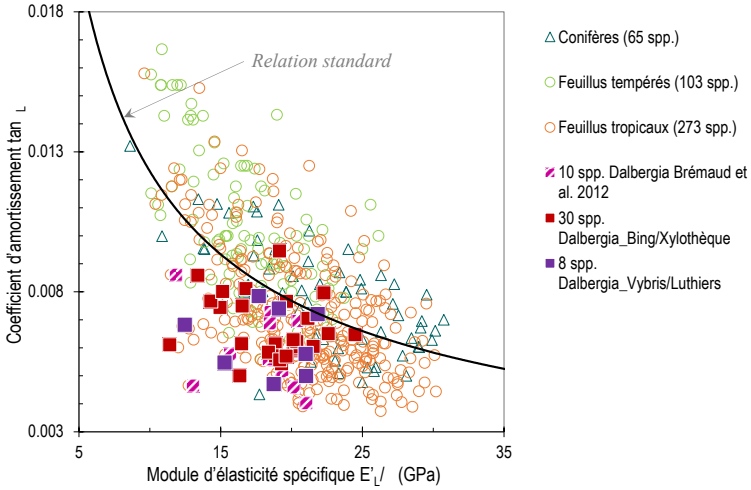


Fig. 1 : Comparaison des propriétés vibratoires de Dalbergia mesurées, avec la littérature ; (symboles ouverts) 450 espèces de conifères, feuillus tempérés et feuillus tropicaux (Brémaud 2012) ; carrés hachurés : espèces de Dalbergia (Brémaud 2012) ; carrés solides : espèces de Dalbergia de l'étude

La Fig. 2 représente l'analyse de corrélations principales pour les *Dalbergia* et différentes espèces utilisées par les luthiers pour la fabrication de guitares (surtout bois de fonds, mais aussi quelques bois de table). Les *Dalbergia* se distinguent bien des autres espèces notamment selon les critères de densité, de faible amortissement, et les teintes « rouges ».

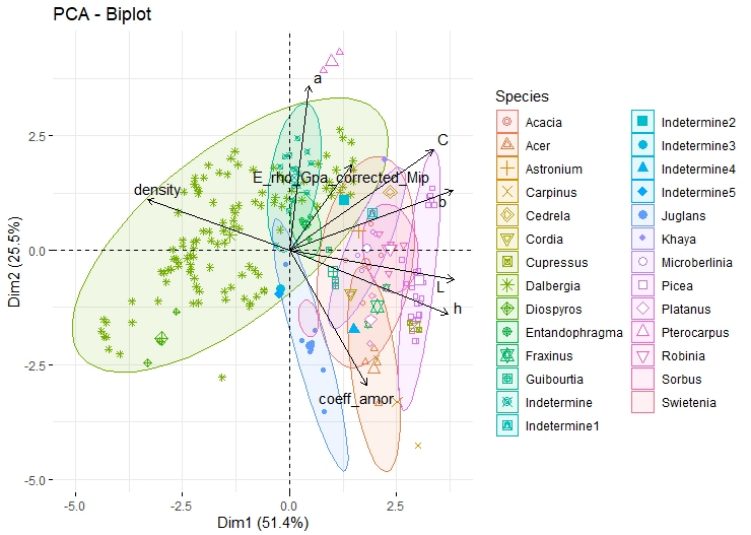


Fig. 2 : Analyse en composantes principales (ACP) : biplot des variables mesurées (flèches) et des individus/spécimens (points) pour les échantillons de Dalbergia, ainsi que d'autres espèces, fournies par des luthiers (espèces groupées par genre botanique).

Conclusion et perspectives

Des propriétés physiques (colorimétrie et densité) et vibro-mécaniques (module spécifique et coefficient d'amortissement) ont été déterminées pour de nombreuses espèces du genre *Dalbergia*. Malgré la faible représentation statistique pour certaines espèces, les données

présentées servent à comprendre des spécificités à l'échelle du genre *Dalbergia.* Les deux méthodes vibratoires ont montré des résultats similaires entre les valeurs obtenues, pour les espèces communes aux deux. Cependant l'échantillonnage utilisé n'a pas encore permis de valider statistiquement si les deux méthodes sont comparables. Des essais sont prévus pour cette validation, la méthode non destructive Bing pourrait alors permettre l'exploration et la génération de nouvelles données des propriétés vibratoires du bois, ainsi que la valorisation de xylothèques. Les *Dalbergia* étudiées se caractérisent pour une spécificité de tendance vers des bois plus rouges et avec des coefficients d'amortissement faibles en comparaison avec les bois d'autres espèces. Cela suggère que sur ces critères, il y a peu d'alternatives d'autres essences montrant des propriétés similaires aux Palissandres. Les valeurs du coefficient d'amortissement sont environ deux fois plus faibles dans l'aubier que dans le duramen. Ce comportement peut être expliqué par les extractibles du bois. Cette hypothèse pourrait être testée par une étude sur les effets d'extractions sur les propriétés vibratoires d'espèces de *Dalbergia*.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement tous les luthiers ayant fournis des échantillons dans le cadre de la collecte/enquête participative menée. Ce travail a été financé par le Labex NUMEV dans le cadre d'un projet exploratoire.

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.

Brémaud I., Amusant N., Minato K., Gril J., Thibaut B. (2011) Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (Pterocarpus soyauxii Taub.). Wood Sci. Technol. 45(3):461-472

Brémaud I. (2012) Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. J. Acoust. Soc. Am., 131(1).

Cervantes A. (2016) La conservación del granadillo en México: Una carrera contra el tiempo. CONABIO.

CITES (2016) CITES CoP17. Global Status of Dalbergia and Pterocarpus Rosewood Producing Species.

EIA (2016) The hongmu Challenge: A briefing for the 66th meeting of the CITES Standing Committee, Environmental Investigation Agency E. January 2016.

Espinoza E.O., Wiemann M.C., Barajas-Morales J., Chavarria G.D., McClure P.J. (2015) Forensic analysis of CITES-Ptrotected Dalbergia timber from the Americas. IAWA J, 36(3).

Georg Richter H., Krause V.-J., Muche C. (1996) Dalbergia congestiflora Standl.: wood structure and physico-chemical properties compared with other Central American species of Dalbergia. IAWA J, 17(3).

Klitgaard B.B. (1999) Floral ontogeny in tribe Dalbergieae (Leguminosae: Papilionoideae): Dalbergia brasiliensis, Machaerium villosum s. l.Platymiscium floribundum, and Pterocarpus rotundifolius. Plant Syst. Evol., 219(1-2).

Ramananantoandro T., Ramanakoto M.F., Rajemison A.H., Eyma F. (2013) Relationship between density and aesthetic attributes of wood and preference of Malagasy consummers. Ann. For. Sci., 70:649–658.

Etude exploratoire de brulage du bois : vers une industrialisation d'une technique traditionnelle

LEROYER Léo, FLECK Sébastien, CHARRIER Bertrand

Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, Mont de Marsan, France
leo.leroyer@univ-pau.fr

Mots clefs : brûlage du bois ; Yakisugi" ou "Shou Sugi Ban" ; résistance aux champignons ; vieillissement accéléré

Contexte et objectifs

En collaboration avec la scierie Labadie (Arué, 40) nous avons étudié le développement d'une ligne de production de bois brulé. Le principe était de s'inspirer de techniques traditionnelles, notamment le « Yakisugi » ou « Shou Sugi Ban », originaire du Japon (Ebner 2019). Le but était de produire des planches de bardage en pin maritime présentant un aspect brulé, avec plusieurs nuances d'effet.

La méthode traditionnelle consiste notamment à former une colonne triangulaire avec des planches de bois, reliées entre-elles avec du fil de fer. Un feu est ensuite allumé à la base de la colonne afin de brûler les faces internes. Un espace est laissé entre chaque planche pour gérer l'appel d'air et donc l'efficacité de la combustion. Celle-ci est contrôlée et dure en moyenne 10 minutes. Il est ensuite nécessaire de séparer rapidement les planches les unes des autres pour éviter une combustion trop importante. Par ailleurs, l'application d'eau de façon abondante est souvent requise pour éteindre des braises formées et retirer d'éventuels résidus.

Le projet a consisté dans un premier temps à élaborer un système de brûlage du bois adapté à un convoyeur horizontal de scierie pour effectuer le brûlage de façon industrielle. Il a ensuite été nécessaire de calibrer le système en fonction des aspects finaux attendus par l'entreprise (profondeur de brûlage, brossage, …) et d'étudier le vieillissement et la résistance du bois brulé aux champignons.

Matériel et méthode

Matières premières

La scierie Labadie a mis à disposition pour ce projet des planches de type dosses de pin maritime traitées classe 4, de dimension 1500x150x27mm. Pour les essais de résistance aux champignons, des aubiers planches non traitées ont également été utilisés.

Système de brûlage du bois

Les systèmes de brûleur utilisés ont été fabriqués au laboratoire de la manière suivante :

- Brûleur Version 1 (V1) : 2 rampes à gaz parallèles (longueur 600 mm, longueur utile 400 mm, diamètre 40 mm, 3 rangées de 40 trous de 1,5 mm, 2 déflecteurs de 30 mm), équipées chacune d'un injecteur à gaz (1,0 mm), et espacées de 100 mm.
- Brûleur Version 2 (V2) : idem V1, mais avec des gicleurs gaz de 1,5 mm et ajout d'une alimentation forcée en air (gicleur d'air comprimé de 2,0 mm).
- Brûleur Version 3 (V3) : idem V2 mais avec séparation des deux rampes à gaz.

Un convoyeur à rouleaux sur lequel les systèmes de bruleurs ont pu être installés a été mis à notre disposition par les Ets Labadie.

L'intensité du brûlage a été maitrisée en réglant la vitesse de passage des planches, et ce via le contrôleur du convoyeur. La vitesse d'avance a été contrôlée à l'aide d'un tachymètre fourni par la scierie.

Résistance aux champignons

La souche de champignon lignivore utilisée a été Poria Placenta. Les éprouvettes de bois ont été découpées aux dimensions suivantes : 40 mm x 20 mm x 5 mm. Le brûlage a été réalisé au bec bunsen sur toutes les faces. 16 échantillons ont ensuite été préparés pour chaque condition, comme présenté dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Conditions des éprouvettes préparées pour les essais de résistance au champignon.

	Echantillons			Témoins	
Traité classe 4	oui	non		oui	non
Brûlé	oui	oui		non	
Brossé	oui	oui	non	non	
nb. échantillons	16	16	16	16	16

La confrontation a duré 5 mois dans des conditions favorables à la croissance des champignons, c'est-à-dire à 25 °C et 70 % d'humidité selon une adaptation de la norme EN 113. La perte de masse a été calculée par différence de pesée des échantillons secs (séchés 48 h à 105 °C) avant et après dégradation.

Vieillissement accéléré

Les essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur des éprouvettes produites en condition industrielle (Tab. 2)

Tab. 2 : Eprouvettes pour les essais de viellissement.

Vitesse de passage des planches ($m.min^{-1}$)	1,5		3,0	
Brossé	oui	non	oui	non
Brulé (nb. échantillons)	4	4	4	4
Brûlé, huilé à l'huile crue (nb. échantillons)	2	2	2	2
Brûlé, huilé à l'huile crue, puis brulée (nb. échantillons)	2	2	2	2

L'essai a duré 126 jours. Des mesures de brillance et de couleur ont été réalisées à deux endroits distincts de chaque échantillon, chaque jour de la première semaine puis une fois pour les deux dernières semaines. La couleur a été mesurée à l'aide d'un spectrocolorimètre X-Rite Ci62 et la brillance à l'aide d'un brillancemètre BYK Garder, micro-tri-gloss.

Résultats et discussion

Calibration du brûlage

Les premiers essais ont été réalisés à l'aide du système de brûleur V1 installé entre deux rouleaux du convoyeur. La vitesse minimale était d'environ 2,5 $m.min^{-1}$, soit 45 s par planche. Dans ces conditions, l'effet brûlé n'était suffisamment marqué et il était nécessaire de les faire passer plusieurs fois (2 ou 3 fois). Avec le système de brûlage V2, tout en réduisant la vitesse de passage à 1,5 $m.min^{-1}$, il est devenu possible d'obtenir un effet brûlé en profondeur et en un

seul passage (Fig. 1 et 2). Enfin, avec la configuration V3, c'est-à-dire en séparant les deux rampes à gaz pour supprimer les interférences de flammes a permis d'améliorer davantage le brûlage.

Fig. 1 : Brûleur V2 implanté sur le convoyeur

Fig. 2 : Essais de brûlage à l'aide du brûleur V2 implanté sur le convoyeur

Une première calibration de l'effet brûlé en fonction de la vitesse d'avance du convoyeur a été entreprise avec les brûleurs V3. Les résultats sont donnés dans le Tab. 3.

Tab. 3 : Première calibration de l'effet brûlé en fonction de la vitesse d'avance du convoyeur muni du système de brûleurs V3

Vitesse ($m.min^{-1}$)	1,5	3	5
Résultat			

Résistance aux champignons

Les pertes de masses après attaques par Poria Placenta sont présentées dans la Fig. 3.

Les pertes de masse des éprouvettes témoin ont montré que la souche de Poria Placenta s'est montrée suffisamment virulente pour dégrader 41,0 ± 10,1 % des témoins.

Les témoins en présence de bois traité (dans la même boite de Pétri) ont été très peu dégradés, tandis que ceux en l'absence de bois traité l'ont été fortement. Une explication pourrait être un problème de manipulation ou bien une diffusion de composés de traitement dans le milieu.

Comme attendu, le bois traité est faiblement attaqué par le champignon (6,0 ± 0,4 % %). Le brûlage ne semble pas avoir d'influence sur ces valeurs. Cela signifie que le brûlage ne détériore pas les produits de traitement.

Le bois brut brûlé présente également une meilleure résistance au champignon, comparativement au témoin (13,6 ± 4,5 % de perte de masse contre 41,0 ± 10,1 %). Par ailleurs, le brossage après brûlage ne semble pas influencer la dégradation par le champignon.

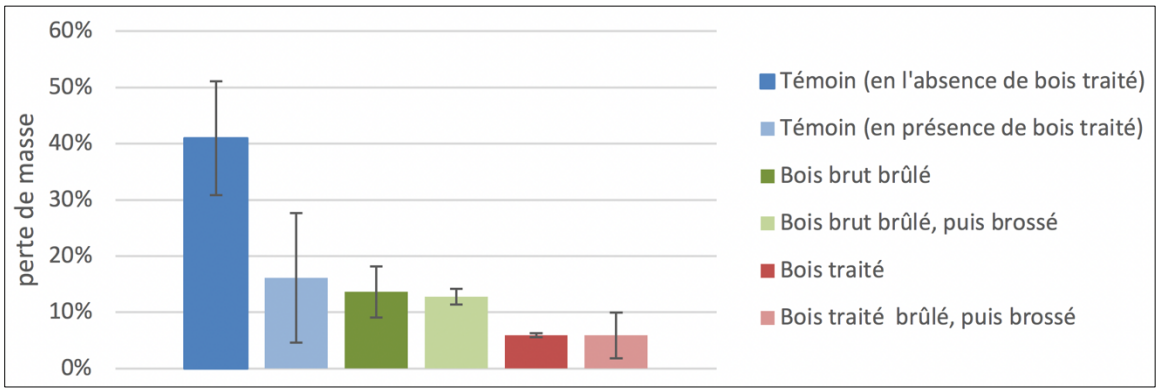


Fig. 3 : Perte de masse après attaque par Poria Placenta

Vieillissement accéléré

Les différents essais de vieillissement accéléré ont montré que la couleur évoluait peu au cours du temps, en particulier lorsque le bois brûlé n'est pas brossé. L'application d'huile de lin conduit à un noir plus profond plutôt stable, mais aussi à une brillance qui a tendance à s'estomper progressivement. Le brûlage de l'huile de lin n'apporte aucune amélioration à la qualité de la surface des planches.

Conclusion et perspectives

Ce projet a montré la faisabilité d'un système de brûlage du bois adapté à une chaine de production industrielle. Les premiers essais de calibration ont permis d'obtenir des finitions satisfaisantes.

D'après les essais de résistance au champignon Poria Placenta, il est apparu que le brûlage seul du bois peut apporter une meilleure résistance. Il devient intéressant de déterminer la classe d'emploi d'un tel produit. Celle-ci devrait se situer aux alentours de la classe d'emploi 3a selon la norme EN 335.

Enfin, les essais de vieillissement accéléré ont montré que la couleur noire du bois brûlé est stable au cours du temps face aux intempéries (eau et UV).

Remerciements

Nous remercions les établissements Labadie, pour la mise à disposition des échantillons et des espaces pour la réalisation des essais.

Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français au titre du Programme d'Investissement d'Avenir – I-site E2S UPPA.

Références

Ebner D., Stelzer R., Barbu M.C. (2019) Study of wooden surface carbonization using the traditional Japanese Yakisugi technique, Pro Ligno, Vol. 15, N° 4, p. 278-283.

EN 335 Mai 2013 Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois

EN 113 Décembre 1996 - Produits de préservation du bois - Méthode d'essai pour déterminer l'efficacité protectrice vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores - Détermination du seuil d'efficacité.

Thermal and chemical analysis of Sudanese biomass for energy and materials production

MOHAMMED Wadah[1, 2], CABARET Thomas[1], OSMAN Zeinab[2], CHARRIER Bertrand[1]

[1]CNRS / University of Pau & Pays de l'Adour, Institute of Analytical Sciences and Physico-Chemistry for the Environment and Materials - Xylomat, UMR5254, 40004, Mont de Marsan, France
[2]Institute of Engineering Research and Materials Technology (IERMT). National Center for Research (NCR). Ministry of Higher Education and Scientific Research. P.O. Box 2404, Khartoum, Sudan.
Mohammed.wadah@univ-pau.fr

Keywords: Biomass; Cotton Stalks; Kenaf; Bagasse; Thermal degradation; Bioenergy; Biocomposites; Gasification process.

Context and objectives

Sudan is one of the richest countries in Africa characterized by the presence of several biomass sources; the basic form of biomass comes mainly from agricultural and wood residues (Omer and Fadalla 2003). Biomass could contribute to the replacement of fossil fuels and reduction of emission of CO_2 according to the environmental regulations in Sudan and Europe. However in Sudan, so far their utilization is still at the experimental level and not very much has been scaled up to the industrial level (Omer 1998). Constraints for widespread use of these fibers include the limited consistency in the quality of fibers, their thermal instability and lack of availability of sufficient data on their properties. As important contributing factors to understand current and future application, potential, economical, ecological, legislative as well technological aspects need to be looked into (Fei et al. 2008), responding to the increasing awareness and concern among the world population toward new environmental regulations. Growing socioecological issues, high rate of depletion of petroleum and mineral resources have promoted an intensive use of biomass wastes. Biomass residues from agricultural wastes are exploring the potential of using cheaper, nontoxic, and renewable resources for the production of energy and composite materials (Ibrahim et al. 2012).

This project will initially examine opportunities for valorization of Sudanese biomass for energy and new biomaterial composites. This could be done by assessing the thermal, chemical, physical and mechanical properties of some natural fibers such as Cotton stacks, Bagasse and Kenaf in order to establish a model for their thermal decomposition and degradation (Jawaid et al. 2017). Establishing of such thermal study is of great importance as extensive knowledge on the thermal decomposition of these fibers is needed considering that in both applications the fibers will be processed at high temperatures (Asadullah. 2014).

Materials and Method

The Sudanese fibers that used in this study are: cotton stacks (4.5 kg), bagasse, the fibrous residue of the cane stalk from a sugar mill after crushing and extraction of the juice (7 Kg) and kenaf, warm-season annual fiber crop where the fibers are extracted from their stalks (2.6 kg). Cotton stalks and Kenaf are collected from Al-Gezira state, Central part of Sudan. Bagasse is provided by the White Nile sugar company.

Thermal analysis. The thermal degradation was performed by using a thermogravimetric instrument (TGA Q50 Instrument) in the Xylomat laboratory in Mont de Marsan, France. Bagasse, kenaf and cotton Stalks were used to study their thermal degradation. For this, 10 mg of sample powder of samples was weighed and put in the small pan for the instrument. The temperature program was from 30 to 600 °C at a heating rate of 10 °C /min. The measurement was conducted under air with a flux of 60 ml/min. Each test was done three times.

Chemical analysis. The chemical characterization of the bagasse, kenaf and cotton stalks including moisture content (105 °C after 24h00), ash (575 °C during 3h00), solubility in hot and cold water, extraction by NaOH (1 %), extraction by organic solvent (ethanol and hexane), cellulose (ethanol and nitric acid) and lignin (sulfuric acid 72 %), was done at the National center for research in Khartoum, Sudan, by using TAPPI standard methods.

Determination of the total phenolic content of bagasse, kenaf, and cotton stalks was done in Xylomat laboratories in France according to Folin-Ciocalteu method according (Aloui et al. 2004). A volume of 2.5 mL of Folin-Ciocalteu reagent was added to 1 mL of aqueous extract, diluted ten times and after 1 minute of incubation, 2 mL of sodium bicarbonate (75 g/L) were added. Then, mixtures were allowed to stand 5 min in a water bath at 50°C. After cooling, sample absorbance was compared with versus prepared water blank was and monitored with a Jenway 6300 spectrophotometer at 760 nm. A solution of gallic acid solution (100µg/mL) was used for calibration. The final results were expressed as % gallic acid equivalent (GAE) per g of dry weight (DW).

Results and Discussion:

Thermal analysis

The thermogravimetric analysis curves for bagasse, kenaf and cotton Stalks respectively were characterized by the same evolution of the mass loss versus temperature as shown in Fig. 1 to 3. The results showed help to understand the thermal behavior of fibers and their applications.

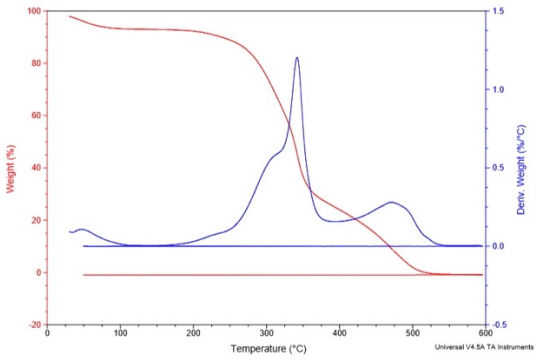


Fig .1: TG & DTG curves of Bagasse

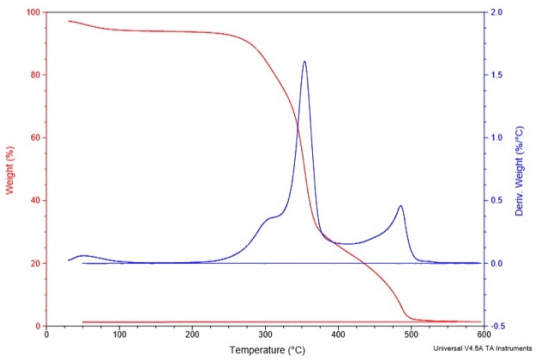


Fig. 2: TG & DTG curve of Kenaf

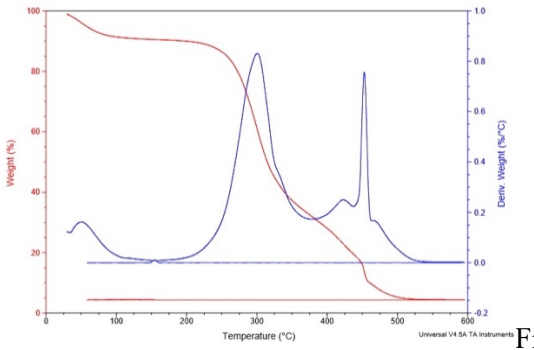


Fig. 3: TG & DTG curve of Cotton Stalks

The analysis of TG & DTG curves for the fibers shows that the kenaf fiber is more stable than bagasse and cotton stalks, while bagasse is more stable than cotton stalks.

Chemical analysis

The chemical characterization for the bagasse, kenaf and cotton stalks are shown in the table below:

No	Test	Bagasse	S.D	Kenaf	S.D	Cotton Stalks	S.D
1	M.C %	7.80	0.07	5.27	0.026	4.47	0.14
2	M.C.F	0.9220	0.00087	0.9472	0.00026	0.9552	0.0014
3	ASH%	8.07	0.054	2.54	0.014	5.36	0.033
4	Extraction by hot water %	14.15	0.123	4.64	0.026	15.51	0.24
5	Extraction by cold water %	11.96	0.038	2.75	0.013	11.33	0.23
6	Extraction by hot NaOH %	43.27	0.123	16.52	0.24	31.43	0.30
7	Cellulose %	50.70	0.27	56.42	0.017	40.94	0.045
8	Extraction by Ethanol%	9.95	0.016	10.11	0.029	9.47	0.022
9	Extraction by Ethanol + n. hexane %	0.190	0.022	0.034	0.0016	0.328	0.0016
10	Extraction by hot water after Ex %	7.98	0.037	6.76	0.043	7.95	0.029
11	Lignin %	21.62	0.016	9.97	0.0082	21.29	0.016
12	Total phenols (%)	1.451	0.0357	0.473	0.0095	3.270	0

The results of the total phenols of bagasse, kenaf, and cotton stalks showed that the fiber with the highest phenol concentration is cotton stalks followed by bagasse and finally kenaf.

The thermogravimetric analysis has shown the stability of fibers below 200 °C. All these results permit us to give a better understanding of the potential use of Sudanese fibers in the future. The chemical analysis for the bagasse has shown that the percentage of cellulose and lignin is 50.70 % and 21.62 % respectively, 42.42 % and 9.97 % for kenaf and 40.94 % and 21.29 % for cotton stalks. The results of the total phenols of bagasse, kenaf, and cotton stalks showed that the fiber with the highest phenol concentration is cotton stalks followed by bagasse and kenaf.

These results permit to enhance the uses of fibers and to understand their current and future application in order to provide the global market with new materials for innovative industrial applications.

References

Aloui F, Ayadi N, Charrier F, et al (2004) Durability of European oak (Quercus petraea and Quercus robur) against white rot fungi (*Coriolus versicolor*): relations with phenol extractives. Holz als Roh- und Werkst., 62:286–290.

Asadullah M. (2014) Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: a review, Renew. Sustain. Energy Rev., 29:201-15.

Fei Y., Qinglin W., Yong L., Weihong G., Yanjun X. (2008) Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. Polymer Degradation and Stability 93 90-98.

Grigaitiene V., Snapkauskiene V., Valatkevicius P., Tamosiunas A., Valincius V. (2011) Water vapor plasma technology for biomass conversion to synthetic gas. Catal Today, 167(1):135-40.

Ibrahim M.S., Sapuan S.M., Faieza A.A. (2012) Mechanical and thermal properties of composites from unsaturated polyester filled with oil palm ash. J Mech Eng Sci, 2:181–6.

Jawaid M., Paridah M.T., Saba N. (2017) Introduction to biomass and its composites. Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00001-9© Elsevier.

Omer A.M., Fadalla Y. (2003) Biogas energy technology in Sudan: Renewable Energy Journal 28:499-507.

Omer A.M. (1998) Sudan energy background; Renewable Energy Journal, 14(1-4):467–72.

Poster non présenté

Le poster suivant était prévu au programme mais n'a pu être présenté lors des journées, l'intervenant ne s'étant pas connecté.

A03

Etude de l'influence de la teneur en eau sur le comportement mécanique des bois tropicaux.

Nyobe Charly Julien, Oum Lissouck René, Yamb Emmanuel,Ayina Ohandja

Etude de l'influence de la teneur en eau sur le comportement mécanique des bois tropicaux

NYOBE Charly Julien[1,3], OUM LISSOUCK René[1,2], YAMB Emmanuel[3], AYINA OHANDJA[1]

[1]Laboratoire de Mécanique et Matériaux, ENSP de Yaoundé I, Cameroun
[2] IUT Bois de Mbalmayo, Cameroun
[3] Département Génie Civil, ENSET de Douala, Cameroun
charly_nyobe@yahoo.fr

Mots clefs : rupture ; fissure ; taux de restitution d'énergie ; facteur d'intensité de contrainte.

Contexte et objectifs

Des informations recueillies auprès de AES-SONEL révèlent que dans la ville de Douala, en moyenne 2000 poteaux de lignes électriques en bois tombent d'eux même annuellement (Eneo 2018) , provoquant des accidents tels que la destruction de véhicules, de maisons et beaucoup d'autres dégâts collatéraux, certains provoquent même des morts d'hommes ; les chutes se faisant de manière inattendue. Le remplacement de ces poteaux fait perdre à la société d'électricité du Cameroun environ 450 000 000 Francs CFA par an, ceci ne tient pas en compte les réparations et indemnisations causées par ces chute (Eneo 2018).

Les causes qui justifient ces désagréments liés à l'utilisation du matériau bois sont multiples. L'une des causes très souvent évoquée est l'humidité ou tout simplement la présence de l'eau.

Le but de ce travail consistait à étudier les influences de la teneur en eau sur le comportement mécanique des bois tropicaux ; cas particulier du Bubinga et du Dibétou.

Matériel et méthodes

Choix de l'essence de bois

Les bois étudiés sont le Bubinga et le Dibétou. 240 éprouvettes ont été préparées pour les essais de fissuration et 160 pour les essais de flexion. Les Fig. 1 et 2 présentent la géométrie des éprouvettes et le Tab. 1 le nombre d'éprouvettes pour les essais (Fonkou et al. 2004)

Fig.1 : Eprouvettes de flexion

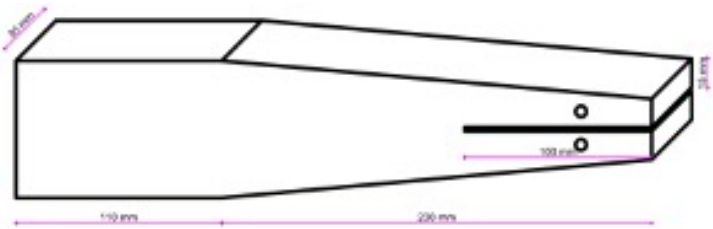


Fig.2 : Eprouvettes pour l'essai de fissuration

Tab.1 : Nombre d'éprouvettes pour essai

Essences	Essai de flexion	Essai de fissuration
Bubinga	80	120
Dibetou	80	120

Mesure de la ténacité.

La ténacité du bois est obtenue par des essais de fissuration (qui permettent de déterminer la valeur de la complaisance et de la charge maximale), pour cela, on positionne l'éprouvette sur l'appareil à l'aide d'un dispositif d'ancrage, ensuite on initialise le comparateur à base de l'éprouvette au niveau de la lèvre de l'amorce de fissure, puis on initialise l'aiguille du comparateur et celle du dynamomètre (de calibre 2,5 KN) à la division zéro, on exerce enfin à l'aide du dynamomètre une charge statique (500 N) sur l'éprouvette jusqu'à la rupture(Sorin 2018).

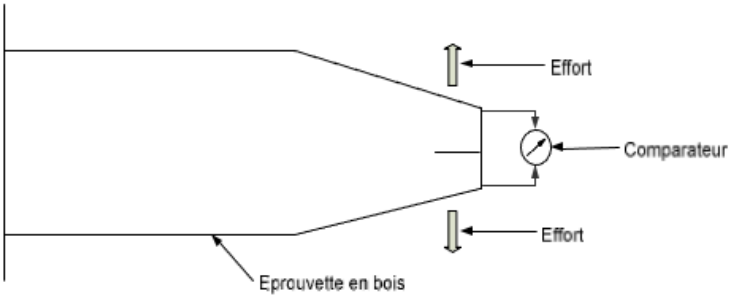


Fig.3 : Schéma du dispositif expérimental.

Essai de flexion

Pour l'essai de flexion, on place l'éprouvette sur l'appareil à l'emplacement réservé à cet effet sur deux appuis, on positionne ensuite le premier comparateur à la base du guide du dynamomètre et la pointe du second comparateur de traction à la division zéro, on initialise les aiguilles des deux comparateurs à la division zéro, puis on exerce à l'aide du dynamomètre de calibre 2,5 KN, une charge statique jusqu'à rupture de l'éprouvette(Moutee 2006)

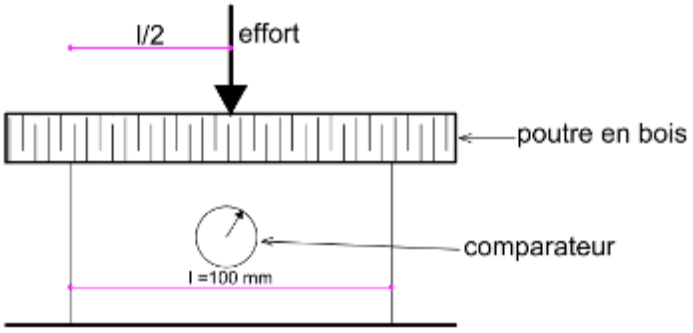


Fig. 4 : Schéma du dispositif expérimental de flexion

Résultats et discussion

Le Tab. 2 présente les résultats obtenus pour les différentes valeures de teneur en eau pour les deux essences de bois.

Nous constatons à partir des résultats obtenus que nos deux essences étudiées présentent un même comportement aussi bien en flexion qu'en fissuration. Sur le plan mécanique, les courbes contrainte d'élasticité en fonction de la teneur en eau H σ_e=f(H) (Fig. 5), contrainte de rutpture en fonction de la teneur en eau σ_r=f(H) (Fig. 6) et taux de restitution d'énergie en fonction de la teneur en eau G_{IC} = f(H) (Fig. 7), montrent que le Bubinga est plus tenace en fissuration que le Dibetou. Les valeurs de ces paramètres (σ_e, σ_r, G_{IC}) diminuent quand le taux d'humidité augmente (Smith et al. 2002, Simpson et al. 1999). Il est annoté que $G_{IC} = -\frac{\partial\psi}{\partial A}$ (ψ l'énergie potentielle totale et A l'aire de fissure).

Tab.2 : Eprouvettes pour essai

ESSENCE	BUBINGA				DIBETOU			
SERIE	1	2	3	4	1	2	3	4
Nombre d'éprouvettes	50	50	50	50	50	50	50	50
Ecart-type	210	205	230	220	250	240	243	248
Cov	20%	18%	22%	25%	30%	25%	33%	27%
Teneur en eau H (%)	12	16,84	20,24	34,15	14,21	17,33	25,98	34,41
G_{Ic} (KJ/m^2)	1,599	1,209	0,472	0,186	0,709	0,366	0,151	0,021
E (MPa)	12070	11116	10010	6604	6326	5961	4492	3681
σ_e (MPa)	37,3	28,45	26,17	20,25	29,63	24,45	23,71	21,93
σ_r (MPa)	108,47	103,71	74,08	50,37	71,26	69,04	53,04	46,10

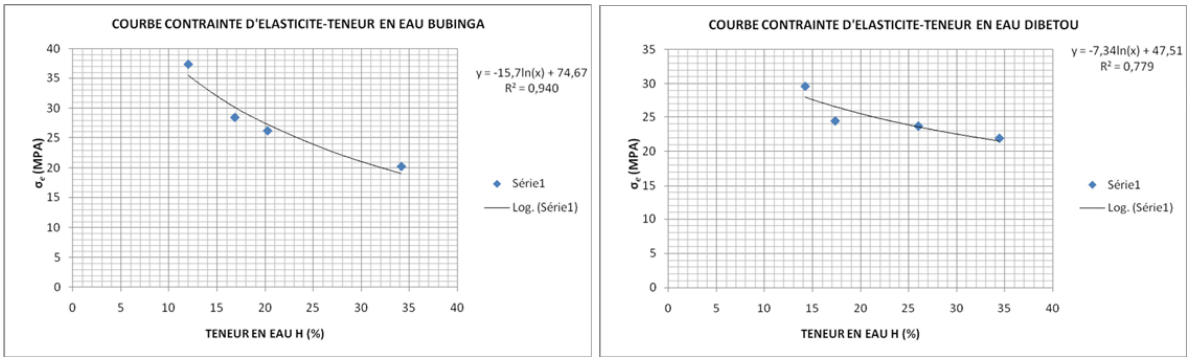


Fig. 5 : Contrainte d'élasticité en fonction de la teneur en eau H : (a) Bubinga ; (b) Dibetou

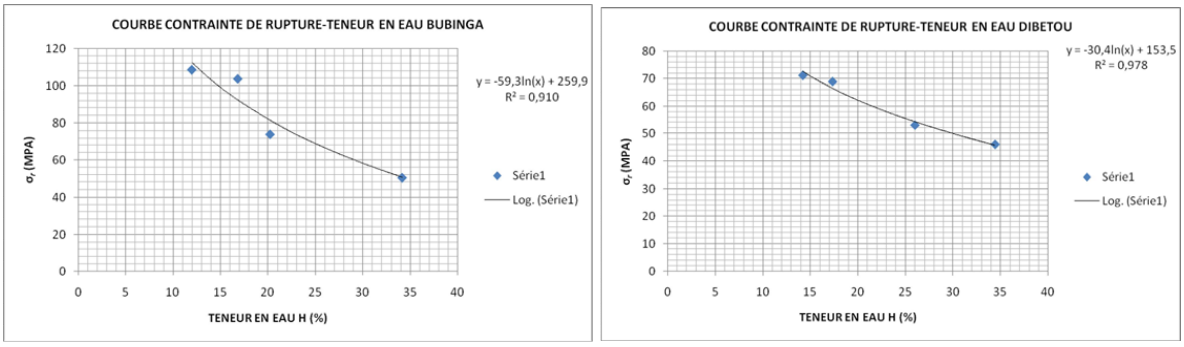


Fig. 6 : Contrainte de rutpture en fonction de la teneur en eau : (a) Bubinga ; (b) Dibetou

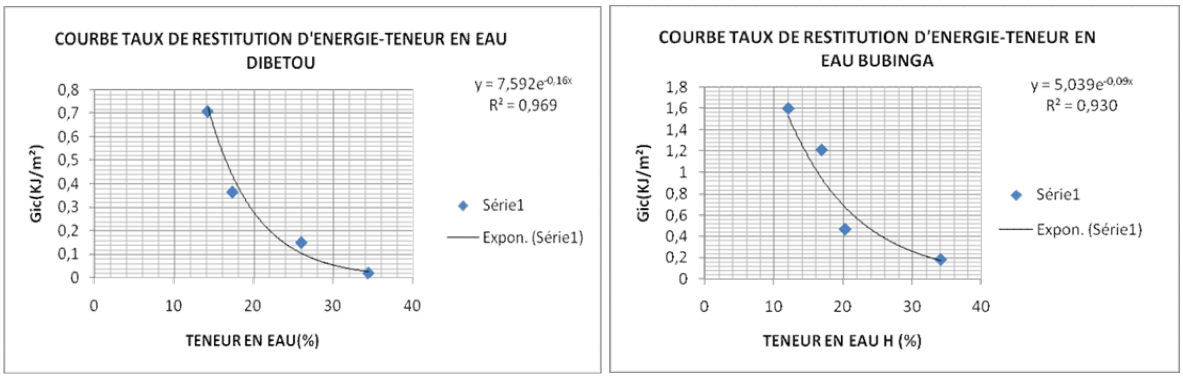


Fig. 7 : Taux de restitution d'énergie en fonction de la teneur en eau : (a) Bubinga ; (b) Dibetou

Conclusion et perspectives

Au terme de ce travail, nous avons mis en évidence l'influence de la teneur en eau sur le comportement mécanique du Bubinga et du Dibétou dans les différents paramètres, à savoir, le taux de restitution d'énergie G_{IC}, la contrainte élastique σ_e et la contrainte de rupture σ_r.

Il s'en est déduit que la teneur en eau dans le bois a une influence fondamentale sur le comportement mécanique de ces bois. Ceci vient confirmer les études de Bodig and Jayne à propos des variations de l'humidité et le comportement mécanique du bois(Bodig and Jayne 1982). Seulement, ce comportement varie en fonction des caractères intrinsèques des différentes essences. C'est donc un phénomène à tenir en compte dans toute conception de structure en bois.

Références

Bodig J., Jayne B.A. (1982) Mechanics of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold.

Eneo (2018) Rapport Annuel, https://eneocameroon.cm/images/pdf/rapport-eneo-anne-2018.pdf

Fonkou N.J., Ebouele M.N.R., Ngopdjop E., Sani E.P. (2004) Fissuration des bois : cas du Ubinga et du Dibétou, mémoire de fin du second cycle, ENSET Douala.

Moutee M. (2006) Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage, Thèse de Doctorat en Sciences du bois, Université de Laval, Québec.

Simpson W., TenWolde A. (1999) Physical properties and moisture relation of wood, chapter 3, Forest Products Laboratory, Wood handbook, pp. 3.1-3.24.

Smith I., Vasic S. (2002) Fracture behaviour of softwood, University of Brunswick, Université de Laval, Canada.

Sorin E. (2018) Fissuration en modes mixtes dans le bois : diagnostic et évaluation des méthodesde renforcement local. Université de Bordeaux.

Liste des participants

Personnes connectées durant au moins l'une des sessions des journées

NOM Prénom	Labo/organisme, ville (pays)	email
ALIX Claire	ArchAm, Paris	claire.alix@univ-paris1.fr
ALLEMAND Charlotte	Navier, Champs-s-M	charlotte.allemand@enpc.fr
ALTEYRAC Jérôme	LabECAM, Lyon	jerome.alteyrac@ecam.fr
ARNOULD Olivier	LMGC, Montpellier	olivier.arnould@umontpellier.fr
ASSEKO ELLA Martian	Pascal, Clermont-Fd	Martian.ASSEKO_ELLA@etu.uca.fr
BADEL Eric	Piaf, Clermont-Fd	eric.badel@inrae.fr
BARBONI Toussaint	SPE, Corte	barboni@univ-corse.fr
BARDET Sandrine	LMGC, Montpellier	sandrine.bardet@umontpellier.fr
BAUDRIT Cédric	I2M, Bordeaux	cedric.baudrit@u-bordeaux.fr
BEAUCHÊNE Jacques	Ecofog, Kourou (GF)	jacques.beauchene@cirad.fr
BELLONCLE Christophe	LIMBHA, Nantes	christophe.belloncle@esb-campus.fr
BENOIST Florent	Fibois-Naq, Bordeaux	florent.benoist@fibois-na.fr
BENTALEB Ilham	ISEM, Montpellier	ilham.bentaleb@umontpellier.fr
BESSEAU Benoît	Labomap, Cluny	benoit.besseau@ensam.eu
BIDZO Cédric Horphe	LaReVa Bois, Libreville (GA)	ndonghorphe@gmail.com
BLANCHARD Philippe	LIMBHA, Nantes	philippe.blanchard@esb-campus.fr
BLÉRON Laurent	Lermab, Epinal	laurent.bleron@univ-lorraine.fr
BLOCH Jean-Francis	3SR, Grenoble	jean-francis.bloch@3sr-grenoble.fr
BODINEAU Matthieu	LIMBHA, Nantes	matthieu.bodineau@etu.esb-campus.fr
BONTEMPS Arthur	Pascal, Clermont-Fd	arthur.bontemps@uca.fr
BOSSU Julie	Ecofog, Kourou (GF)	juliebossu@hotmail.fr
BOURHIS Fabien	PNR Chartreuse, Grenoble	fabien.bourhis@parc-chartreuse.net
BRANCHERIAU Loïc	Biowooeb, Montpellier	loic.brancheriau@cirad.fr
BRÉMAUD Iris	LMGC, Montpellier	iris.bremaud@umontpellier.fr
BRENDEL Oliver	Silva, Nancy	oliver.brendel@inrae.fr
BROSSIER Benoît	ISEM, Montpellier	benoit.brossier@umontpellier.fr
BURGERS Agnès	LMGC, Montpellier	agnes.burgers@umontpellier.fr
CANDELIER Kévin	Biowooeb, Montpellier	kevin.candelier@cirad.fr
CASTETS Laurent	Gascogne Bois, Bordeaux	lcastets@gascognebois.com
CAURLA Sylvain	Beta, Nancy	sylvain.caurla@inrae.fr
CHABBERT Brigitte	Fare, Reims	brigitte.chabbert@inrae.fr
CHAIX Gilles	Agap, Brésil/Piracicaba	gilles.chaix@cirad.fr
CHANUT Julien	PAM, Dijon	julie.chanut@agrosupdijon.fr
CHAPLAIN Myriam	I2M, Bordeaux	myriam.chaplain@u-bordeaux.fr
CHARRIER Bertrand	Iprem, Pau	bertrand.charrier@univ-pau.fr
CHAUMONTET Marion	C.C.Grésivaudant, Grenoble	mchaumontet@le-gresivaudan.fr
CIANO Juilette	LMGC, Montpellier	juliette.ciano@hotmail.fr
CLAIR Bruno	LMGC, Montpellier	bruno.clair@cnrs.fr
CLAUDIEN Kevin	Lermab, Epinal	kevin.claudien@orange.fr
COLIN Francis	Silva, Nancy	francis.colin@inrae.fr
COLMARS Julien	Lamcos, Lyon	julien.colmars@insa-lyon.fr
COSTA Guy	Peirene, Limoges	guy.costa@unilim.fr
COURT Florian	Dept_HA, Grenoble	f.court@cc-paysdesecrins.com
CRITIN Camille	CAUE-Isère, Grenoble	camille.critin@caue-isere.org
CURTI Rémi	ICA, Tarbes	remi.curti@iut-tarbes.fr
DARPENTIGNY Clementine	LGP2, Grenoble	clementine.darpentigny@grenoble-inp.fr
DÉJARDIN Annabelle	BioForA, Orléans	annabelle.dejardin@inrae.fr
DENAUD Louis	Labomap, Cluny	louis.denaud@ensam.eu
DEVILLERS Philippe	Lifam, Montpellier	phd.devillers@gmail.com
DIAZ Léa	Iprem, Pau	lea.diaz@sfr.fr
DIGBE Thomas	INP-HB, Yamoussoukro (CI)	digbeespoir@gmail.com
DLOUHA Jana	Silva, Nancy	jana.dlouha@inrae.fr
DUBOIS Joan	LGHL,	joan.jaco1@gmail.com

NOM Prénom	Labo/organisme, ville (pays)	email
DUCHEMIN Benoit	LOMC, Le Havre	benoit.duchemin@univ-lehavre.fr
DUFRAISSE Alexa	AASPE, Paris	dufraisse@mnhn.fr
DUMARÇAY Stéphane	Lermab, Nancy	stephane.dumarcay@univ-lorraine.fr
DUPLEIX Anna	LMGC, Montpellier	anna.dupleix@umontpellier.fr
DUREISSEIX David	Lamcos, Lyon	David.Dureisseix@insa-lyon.fr
ECARNOT Marielaure	OZ Le design, Grenoble	mlze@ozledesign.com
EKOMY ANGO Serge	LaReVa Bois, Libreville (GA)	ekomyango@yahoo.fr
ELAIEB Mohamed-Tahar	INRGREF, Tunis (TN)	ayeb2002@yahoo.fr
ENGONGA Arnauld	Piaf, Clermont-Fd	arnauld.engonga-edzang@inrae.fr
ESCAMEZ Sacha	Plant Science Centre, Umea (SE)	sacha.escamez@slu.se
ESPINOSA Luis	ICA, Tarbes	lfespinosam@unal.edu.co
EYMA Florent	ICA, Tarbes	florent.eyma@iut-tarbes.fr
EYMAR-DAUPHIN Nastasia	Fibois-Isère, Grenoble	n.eymar-dauphin@fibois38.org
FARRÉ Etienne	Silva, Nancy	etienne.farre@inrae.fr
FAU Amélie	LMT, Saclay	amelie.fau@ens-paris-saclay.fr
FÉLIX-FAURE Jacques	ENSAG-AE&CC, Grenoble	felix-faure.j@grenoble.archi.fr
FEYT Grégoire	Pacte, Grenoble	gregoire.feyt@univ-grenoble-alpes.fr
FIOCCA Amélie	URFM, Avignon	amelie.fiocca@inrae.fr
FOADIENG Emmanuel	ENSET Kumba, Buea (CM)	foidienge@yahoo.fr
FOURNELY Eric	Pascal, Clermont-Fd	eric.fournely@uca.fr
FRANCÈS Manon	Iprem, Pau	manon.mg.frances@gmail.com
FRAYSSINHES Rémy	Labomap, Cluny	remy.frayssinhes@ensam.eu
FRITSCH Clement	Lermab, Nancy	clement.fritsch@univ-lorraine.fr
FROMENT Karine	ArcNucleart, Grenoble	anne-karine.froment@cea.fr
FUMAGALLI Matthieu	IMP, Lyon	matthieufumagalli@gmail.com
GALIMARD Philippe	I2M, Bordeaux	philippe.galimard@u-bordeaux.fr
GAUVIN Cécilia	SMAC, ? (NL)	cecilia.gauvin@gmail.com
GÉNEVAUX Jean-Michel	Laum, Le Mans	Jean-Michel.Genevaux@univ-lemans.fr
GÉRARDIN Philippe	Lermab, Nancy	philippe.gerardin@univ-lorraine.fr
GIRARDON Stéphane	Labomap, Cluny	Stephane.Girardon@ensam.eu
GODI Gaël	Pascal, Clermont-Fd	gael.godi@uca.fr
GOLI Giacomo	Dagri, Florence (IT)	giacomo.goli@unifi.it
GOUTIÈRE Myriam	Lermab, Epinal	myriam.goutiere8@etu.univ-lorraine.fr
GRANGÉ Jérémy	DGD DIT_Programmes territoriaux,	jeremy.grange@univ-grenoble-alpes.fr
GRELIER Stéphane	LCPO, Bordeaux	stephane.grelier@u-bordeaux.fr
GRIL Joseph	Pascal, Clermont-Fd	joseph.gril@cnrs.fr
GROS Serge	ENSAG-APM, Grenoble	hellosergegros@gmail.com
GUÉLOU Romain	ICA, Tarbes	romain.guelou@iut-tarbes.fr
GUYOT Alban	Biowooeb, Montpellier	alban.guyot@cirad.fr
HAMDI Seif-Eddine	I2M, Bordeaux	seif-eddine.hamdi@u-bordeaux.fr
HARTMANN Félix	Piaf, Clermont-Fd	felix.hartmann@inrae.fr
HEIM Lucie	Labomap, Cluny	lucie.heim@ensam.eu
HENIN Jean-Marc	LTB, Gembloux (BE)	jeanmarc.henin@spw.wallonie.be
HENTGES David	Lermab, Nancy	hentges.david@yahoo.de
HOPPE Sandrine	LRGP, Nancy	sandrine.hoppe@univ-lorraine.fr
HSIEH Tai-Yun	LMGC, Montpellier	tai-yun.hsieh@umontpellier.fr
HU Hsien-Tsung	LMGC, Montpellier	hsien-tsung.hu@umontpellier.fr
HUART Sylvain	Sylvatech, Nancy	sylvain.huart@inrae.fr
HUBERT Alix	ENSAG, Grenoble	alixhubert@hotmail.com
IMBERT Laurent	LIRMM, Montpellier	laurent.imbert@lirmm.fr
INGOLD Jean-Baptiste	?	ingold.jb@gmail.com
IRLE Mark	LIMBHA, Nantes	Mark.Irle@esb-campus.fr
JACOB Lauranne	Xylofutur,	lauranne.jacob@xylofutur.fr
JARRIN Aurélie	Xylofutur, Lyon	aurelie.jarrin@xylofutur.fr
JARYSTA Matthieu	0, Nancy	matthieu.jarysta3@etu.univ-lorraine.fr
JOFFROY Thierry	ENSAG-AE&CC, Grenoble	joffroy.t@grenoble.archi.fr
JULLIEN Delphine	LMGC, Montpellier	Delphine.Jullien@umontpellier.fr
KARAM Reine	LGCgE, Béthune	reine.karam@imt-lille-douai.fr

NOM Prénom	Labo/organisme, ville (pays)	email
KHARRAT Wassim	Laval, Québec (CA)	wassim.kharrat.1@ulaval.ca
KIBLEUR Pierre	WoodLab, Gent (BE)	pierre.kibleur@ugent.be
LABBAS Vincent	TRACES, Toulouse	vincent.labbas@univ-tlse2.fr
LACHENAL Dominique	LGP2, Grenoble	dominique.lachenal@grenoble-inp.fr
LAEUFFER Hortense	LMT, Saclay	hortense.laeuffer@ens-paris-saclay.fr
LAMOUROUX Margotte	LET-LAVUE, Paris	margottelamouroux@gmail.com
LANATA Francesca	LIMBHA, Nantes	francesca.lanata@esb-campus.fr
LAVALETTE Anne	Panibois, Orléans	anne.lavalette@panibois.com
LE GALLIC Florian	LGP2, Grenoble	Florian.Le-Gallic@lgp2.grenoble-inp.fr
LEBÉE Arthur	Navier, Champs-s-M	arthur.lebee@enpc.fr
LEHNEBACH Romain	WoodLab, Gand (BE)	lehnebach.romain@hotmail.fr
LENOIR Nicolas	3SR, Grenoble	nicolas.lenoir@3sr-grenoble.fr
LEROYER Léo	Iprem, Pau	leo.leroyer@univ-pau.fr
LESIRE Cécile	LTB, Gembloux (BE)	clesire@guest.ulg.ac.be
LICITRA Nadia	ENSAG-AE&CC, Grenoble	licitra.n@grenoble.archi.fr
LOPES QUIRINO Rafael	GSU, Georgia (US)	rquirino@georgiasouthern.edu
LORENZETTI Jean-Valère	SPE, Corte	lorenzetti_je@univ-corse.fr
LYON-CAEN Jean-François	ENSAG, Grenoble	jean-francois.lyon-caen@grenoble.archi.fr
MARCHAL Rémy	Labomap, Cluny	remy.marchal@ensam.eu
MARCON Bertrand	Labomap, Cluny	Bertrand.marcon@ensam.eu
MARLIN Nathalie	LGP2, Grenoble	nathalie.marlin@grenoble-inp.fr
MARTHELY Jessica	Le labo bois,	jessmart972@gmail.com
MARTIN Corinne	Silva, Nancy	corinne.martin@agroparistech.fr
MAURIN Emmanuel	CRC, Champs-s-M	emmanuel.maurin@culture.gouv.fr
MAZEL Ivan	ENSAG, Grenoble	ivan.mazel@gmail.com
MERMET Benjamin	Fibois-Aura, Lyon	b.mermet@fibois-aura.org
MICHAUD Franck	LIMBHA, Nantes	franck.michaud@esb-campus.fr
MOHAMMED Wadah	Iprem, Pau	Mohammed.wadah@univ-pau.fr
MOISY Cédric	Agap, Montpellier	cedric.moisy@vignevin.com
MONOT Claire	LGP2, Grenoble	claire.monot@gmail.com
MONTERO Cédric	LMGC, Montpellier	cedric.montero@umontpellier.fr
MORI Aurélie	R.AuRA, Lyon	aurelie.mori@auvergnerhonelapes.fr
MOUTOU PITTI Rostand	Pascal, Clermont-Fd	rostand.moutou_pitti@uca.fr
NAFA Zahreddine	LGCH, Guelma (DZ)	naf_zah@yahoo.fr
NARCY Alma	Navier, Champs-s-M	alma.narcy@cstb.fr
NISHIYAMA Yoshiharu	Cermav, Grenoble	yoshi@cermav.cnrs.fr
NKENE MEZUI Estelle	LaReVa Bois, Libreville (GA)	esthernkenemezui@gmail.com
NOËL Delphine	IAM, Nancy	delphine6noel@gmail.com
NOEL Johanna	IRENEE, Nancy	johanna.noel@univ-lorraine.fr
NORMAND Aubin	CINaM, Marseille	aubin.nor@gmail.com
NOYER Estelle	CzechGlobe, Brno (CZ)	noyer.estelle@gmail.com
NSOUAMI Valérie	LaReVa Bois, Libreville (GA)	nsouamijeanj@gmail.com
OBOUNOU AKONG Firmin	Lermab,	firmin.obounou-akong@univ-lorraine.fr
OBRECHT Laetitia	OZ Le design, Grenoble	lo@ozledesign.com
OSWALD Apolline	Xylofutur, Bordeaux	apolline.oswald@xylofutur.fr
PACHECO Luis Paulo	Ci-Esg, Vila Nova de Cerveira (PT)	luispaulo@esg.pt
PAGNOUX Antoine	ASP Architecture,	a.pagnoux@asparchitecture.fr
PÉTRISSANS Anélie	Lermab, Nancy	anelie.petrissans@univ-lorraine.fr
PEYROUX Robert	3SR, Grenoble	Robert.Peyroux@univ-grenoble-alpes.fr
PHAN Nhat Tung	Pascal, Clermont-Fd	nhat_tung.phan@etu.uca.fr
PILATE Gilles	BioForA, Orléans	gilles.pilate@inrae.fr
PIRES FRANCO Mariana	Agap, Piracicaba (BR)	ma.pires@hotmail.com
POT Guillaume	Labomap, Cluny	guillaume.pot@ensam.eu
PUJOL Sophie	Chrono-environnement, Besançon	sophie.pujol@univ-fcomte.fr
PURBA Citra	Labomap, Cluny	citra.purba@ensam.eu

NOM Prénom	Labo/organisme, ville (pays)	email
QUINTERO Christian	GC2D, Egletons	christian.quintero-reyes@etu.unilim.fr
RABEVAZAHA Felana	ESSA, Tananarive (MG)	felanaralay@gmail.com
RAMANANANTOANDRO Tahiana	ESSA, Tananarive (MG)	ramananantoandro@gmail.com
RANDRIAMBININTSOA Tiavina	ESSA, Tananarive (MG)	randriambinintsoat@gmail.com
RAOBELINA Andry Clarel	ESSA, Tananarive (MG)	andryclarel@gmail.com
RASOAMANANA Lalaina Patricia	ESSA, Tananarive (MG)	patriciarasoamanana@gmail.com
RAVELONANOSY Harinomena Rinah	ESSA, Tananarive (MG)	rinahravelonanosy@gmail.com
RAYDAN Nidal Del Valle	Iprem, Pau	ndvraydan@univ-pau.fr
RAZAFIMAHATRATRA Andriambelo Radonirina	ESSA, Tananarive (MG)	andriambelo.radonirina@gmail.com
REBHI Amal	I2M, Bordeaux	amal.rebhi@u-bordeaux.fr
RHAZI Naima	Iprem, Pau	rhazinaima2@gmail.com
RIAILLE Axelle	C.D.38, Grenoble	axelle.riaille@isere.fr
RIBEIRO Sébastien	Silva, Nancy	sebastien.ribeiro@univ-lorraine.fr
RICHARD Béatrice	Silva, Nancy	beatrice.richard@inrae.fr
RODA Jean-Marc	F&S, Malaisie/	jean-marc.roda@cirad.fr
RODRIGUES-SOARES DAVID	ENSAG, Grenoble	soares.d@grenoble.archi.fr
ROUGER Frédéric	FCBA, Champs-s-M	frederic.rouger@fcba.fr
ROUX Benjamin	Labomap, Cluny	benjamin.roux@ensam.eu
RUBINI Morandise	Iprem, Pau	morandise.rubini@univ-pau.fr
RUELLE Julien	Silva, Nancy	julien.ruelle@inrae.fr
SAAD Houda	CNRSM, Tunis (TN)	saad_houda@yahoo.com
SAUVAGE Leila	U.Delft, Delft (NL)	L.sauvage@rijksmuseum.nl
SAUVAT Nicolas	GC2D, Egletons	nicolas.sauvat@unilim.fr
SHINDO Lisa	IMBE, Aix-en-Prov.	shindo@mmsh.univ-aix.fr
SIEFFERT Yannick	3SR, Grenoble	yannick.sieffert@3sr-grenoble.fr
SOUSSEAU Yann	I2M, Bordeaux	yann.sousseau@u-bordeaux.fr
SUAREZ-DIAZ Sebastian	LMGC, Montpellier	sebastian.suarezdiaz@agroparistech.fr
TALANSIER Emeline	LEP, Grenoble	emeline.talansier@univ-grenoble-alpes.fr
TALLA Pierre-Kisito	L2MSP, Dschang (CM)	tpierrekisito@yahoo.com
TEISSIER DU CROS Rémi	Taransaud, Cognac	rteissierducros@taransaud.com
TEVI Komlan Renaud	I2M, Bordeaux	komlan-renaud.tevi@u-bordeaux.fr
THAI Minh Van	I2M, Bordeaux	minh-van.thai@u-bordeaux.fr
THÉVENON Marie-France	Biowooeb, Montpellier	marie-france.thevenon@cirad.fr
THIBAUT Bernard	LMGC, Montpellier	bernard.thibaut@umontpellier.fr
TOUSSAINT Evelyne	Pascal, Clermont-Fd	Evelyne.Toussaint@uca.fr
TOUZARD Maeva	Cermav, Grenoble	maeva.touzard@cermav.cnrs.fr
TRABAUD Vincent	ENSAG-AE&CC, Grenoble	vincenttrabaud.asso.lincs@gmail.com
TROUY Marie-Christine	Lermab, Epinal	marie-christine.trouy@univ-lorraine.fr
UWIZEYIMANA Placide	ICA, Tarbes	Placide.uwizeyimana@iut-tarbes.fr
VALADE Aude	Eco&Sols, Montpellier	aude.valade@cirad.fr
VAN DEN BULCKE Jan	WoodLab, Gent (BE)	jan.vandenbulcke@ugent.be
VAN ROOIJ Arnoul	Piaf, Clermont-Fd	vanrooij.arnoul@gmail.com
VARICHON Dominique	CEGF, St-Dié-des-Vosges	foret.expert@gmail.com
VIGUIER Joffrey	Labomap, Cluny	Joffrey.viguier@ensam.eu
WADI Husam	I2M, Bordeaux	hosamcu@hotmail.com
YOUSEFI MASHOUF Hamid	Gipsa, Grenoble	hamidyousefimashouf@gmail.com