

Colloque
Objectif développement durable
L'ingénierie se met au vert

8 et 9 juillet 2019, Paris



Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes

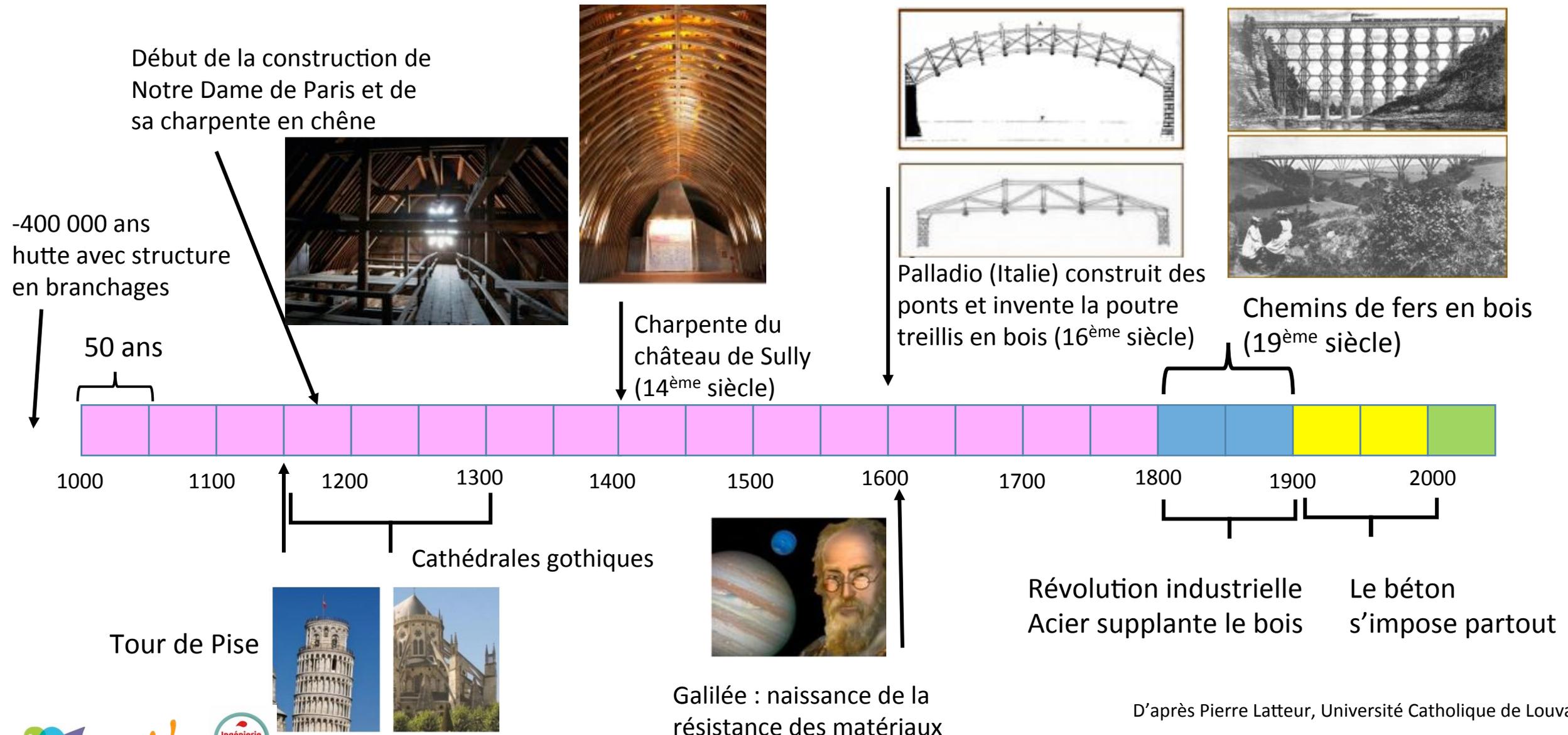
Projet GreenWood : Utilisation du bois vert dans la construction :
Effet du séchage sur les propriétés rhéologiques et hydriques

Sandrine Bardet, LMGC UMR5508, Montpellier

Sabine Caré, Laboratoire NAVIER UMR8205, Champs-sur-Marne

Contexte

Le bois dans la construction : aspects historiques



Contexte

Le bois dans la construction : aspects historiques



Avant le XIXe siècle :

- La construction en bois était une technique courante en France (exemple des maisons à colombage)
- Bois vert (ou ressuyé) utilisé dans la construction, pour les bâtiments ou les ouvrages de franchissement.

→ Arbres (en majorité des chênes) coupés pendant la période de repos végétatif, **bois taillés verts** et mis en œuvre +/- dans les mois suivants (donc non complètement sec à l'air)



Atelier d'ébéniste, 1425 (Lavier C. , Wood in the history of Medieval book techniques: aims and know-how. First restorations. Care and Conservation of Manuscripts, 2005)



Maison à colombage et encorbellements primitifs à Rouen (XIV^e siècle)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Maison_%C3%A0_colombages#/media/Fichier:Encorbellement-primitif.JPG

A partir du XIXe siècle, « évènements historiques » :

- Au début de l'ère industrielle, le bois a été utilisé pour produire l'énergie.
- Construction des ouvrages de soutènement lors des guerres de 1870 et de 1914-1918

→ **Pénurie de matière première**, et, après la Grande Guerre, le **manque de main-d'œuvre qualifiée** pour le travailler (perte de savoir-faire)

→ **Bois séché dans des séchoirs artificiels** (début des recherches en France au XXe siècle)

Contexte

Le bois dans la construction : aspects historiques



Actuellement (fin XXe siècle) pour le bois de construction (bois massif, hors bois reconstitué, e.g. LVL, CLT) :

➤ **Retard de la France** % aux autres pays pour la construction nouvelle

Construction Bois = **8%** au total

Perspectives →

10% de part de marché

3% du logement collectif

➤ **Besoins pour réhabiliter** des bâtiments

Chantier CNRS Notre-Dame et Association des scientifiques au service de la restauration de Notre-Dame de Paris <https://www.scientifiquesnotre-dame.org/>



Source : <https://www.tiro.fr/>

Maison ossature bois :

- 1 maison sur 10 en France
- 9 maisons sur 10 aux Etats-Unis

➤ **Transition écologique : Plan d'action interministériel** de filière

forêt-bois (18 actions cibles et 3 actions transversales)

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/filiere-foret-bois-gouvernement-annonce-plan-daction-interministeriel-et-signer-contrat-filiere-2018>

FRANCE
BOIS
2024



Une nécessité par rapport aux

enjeux climatiques

Mais actuellement les bois sont

séchés et en majorité des

résineux importés

Contexte

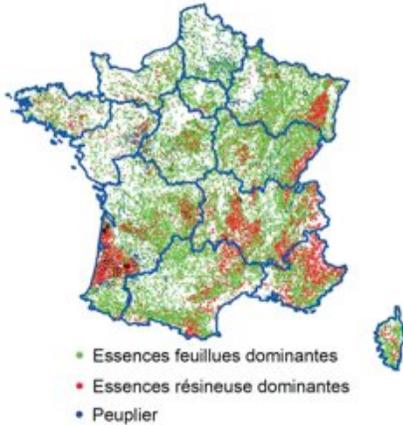
Le bois dans la construction : les enjeux climatiques



Ressource locale...

Forêt française = **31% du territoire** métropolitain

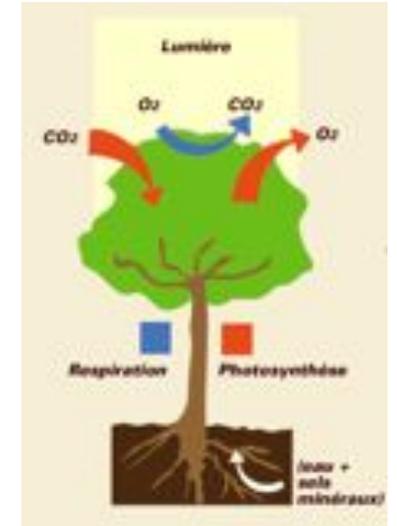
- 65% feuillus
- 35% résineux
- CO₂ lié au transport



<http://www.bois.com/environnement/construire-durable/avantages-environnementaux>

Ressource écologique ...

- La forêt **absorbe du CO₂** bilan respiration < bilan photosynthèse
« La forêt française capte 15% des émissions de CO₂ annuelle française »
(ref ministère de l'agriculture)
- 1m³ de bois = 1 tonne de CO₂ absorbé** : Consommer du bois permet de **conserver le CO₂ stocké par les arbres**
- Bilan (production + extraction + transformation) CO₂ **positif** / béton, acier, aluminium ...
- Bonne isolation thermique > réduction des dépenses énergétiques



... abondante et renouvelable

Surface de forêt en ↗
(+21% en 30 ans)
Récolte annuelle bois d'œuvre = 50 millions m³
< croissance annuelle

Actuellement : 27% du bois d'œuvre récolté = feuillus !! Et importation de bois résineux

... et propre

Chantier court et sec
(peu de déchets, peu d'eau consommée)

Matériau **léger**

Refuge du Goûter
Saint-Gervais-Mont-Blanc,
Haute-Savoie
3835m d'altitude



Contexte

Le bois vert : Verrous et enjeux



De nos jours :

Bois vert très peu utilisé dans la construction ou l'aménagement urbain, sauf dans le secteur de la charpente traditionnelle (rénovation) ou l'utilisation en bois rond...



Rénovation de charpente
<http://latelierduboisvert.fr>



Glissières de sécurité en bois rond de pin classe 4
technologie Durapin - PIVETEAUBOIS

Equarrissage de grume de mélèze

charpentier : Benoît Dubost
(Hautes Alpes)
© Eichii Obataya,
Woodscicraft 2015

Avantages

- Économie d'énergie / séchage artificiel ou gain de temps / séchage naturel
- Utilisation des bois de qualité secondaire

Verrous scientifiques et technologiques

- Assurer une construction ventilée
- Contraintes des normes constructives basées sur les résineux et des bois secs
- Manque de connaissance du comportement à long terme du bois chargé à l'état vert
- Les forêts de Moyen Age ne sont pas celles actuelles (climat, sylviculture) : i.e. le comportement du bois du passé peut différer de celui actuel produit par les arbres

Enjeux

- Economie circulaire : bois local (feuillus) et développer l'artisanat et le savoir-faire local
- Innover dans de nouveaux concepts de construction avec le bois vert en utilisant les contraintes de séchage (autoblocage?)

Le projet PEPS GREENWOOD

Programme de travail



Le projet Green Wood

Financement 2018
PEPS et Réseaux Ingénierie verte
CNRS INSIS



Objectif = étudier les propriétés du bois vert pour développer son utilisation dans la construction

(1) Comportement hydrique du bois vert

- Comment le bois vert sèche-t-il ? Avec quelle cinétique ?
 - Suivi de l'eau par RMN, et TomoX (Navier)
- Comment se déforme le bois vert au cours du séchage ?
 - Suivi des masses et des dimensions (LMGC + Navier)

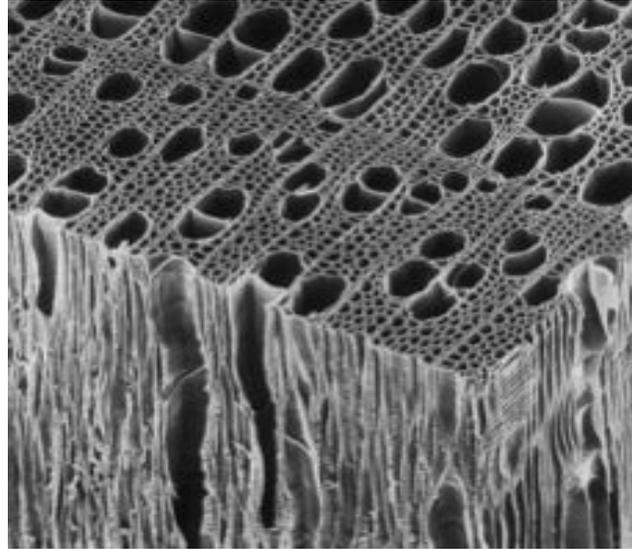
(2) Comportement différé du bois vert en flexion

- Quelles sont les propriétés mécaniques du bois vert ?
 - Mesures de modules de rigidité (LMGC)
- Comment se déforme le bois vert dans le temps ?
 - Mesures de déformations de fluage dans le temps (LMGC)

(3) Assemblage de bois vert

- Quelle est la tenue d'un assemblage de bois vert ?
- Peut-on utiliser les déformations de séchage pour bloquer un assemblage ?

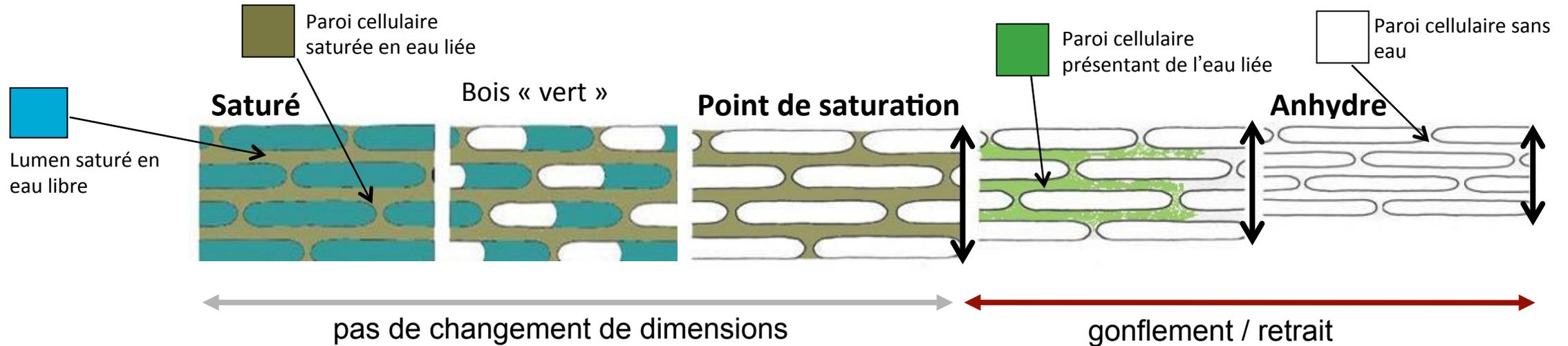
L'eau dans le bois



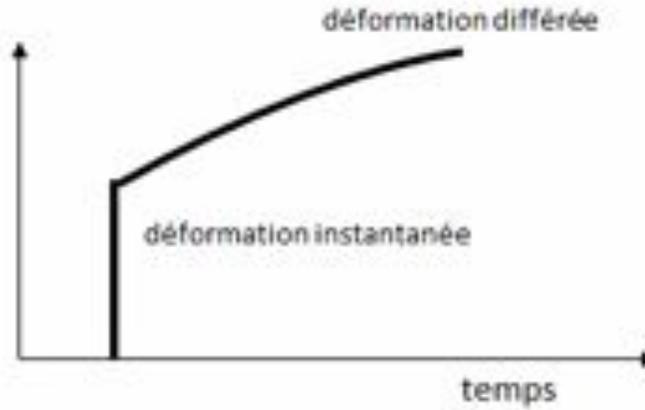
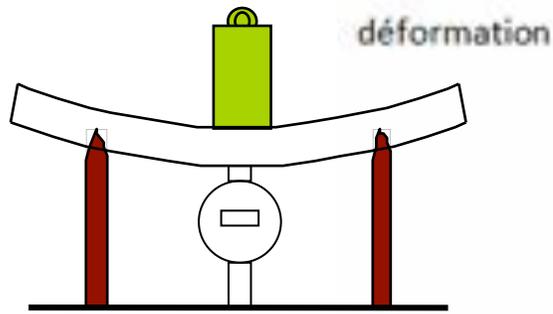
Matériau **cellulaire**
en nid d'abeille
Fibres / vaisseaux (pour un feuillu)

Sensible à l'humidité

sa teneur en eau dépend de l'humidité relative de l'environnement



Le comportement différé



Fluage

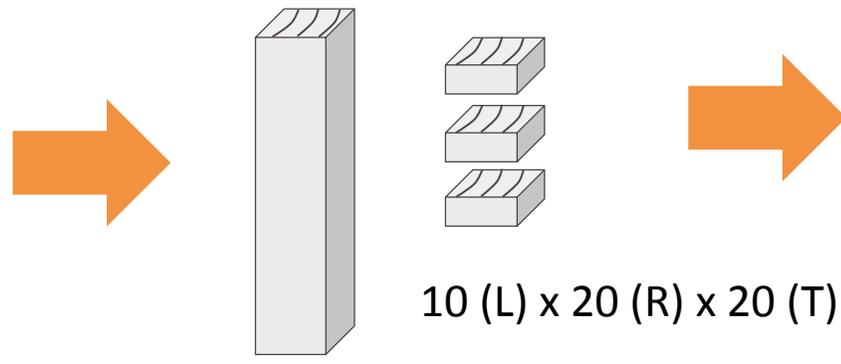
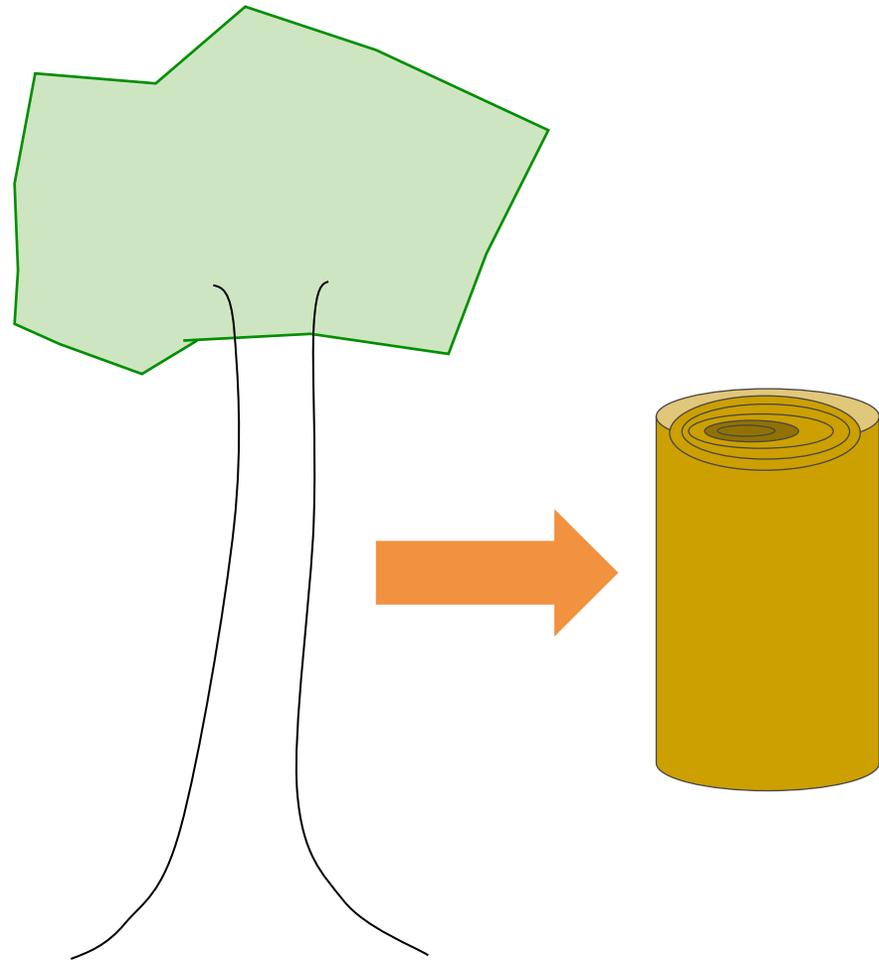
Charge mécanique constante
> la déformation augmente au cours du temps

Mécano-sorption :

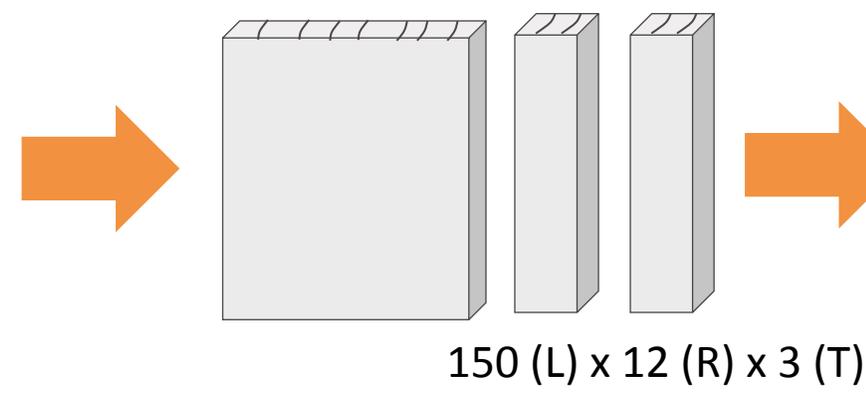
Charge mécanique + variation d'humidité
> la déformation différée augmente

Echantillonnage

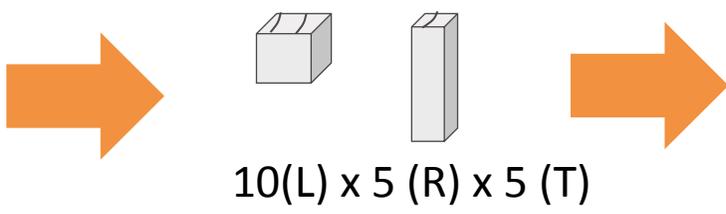
Commun aux deux laboratoires



Caractérisation hydrique et déformations induites :
Sorption /désorption
(LMGC/NAVIER)



Caractérisation mécanique :
vibratoires (LMGC)
Fluage et flexion (LMGC)
Traction (LMGC)



Caractérisation hydrique RMN
et tomographie X (NAVIER)

Echantillonnage

Commun aux deux laboratoires



Peuplier, Montpellier (34) :
**barreaux utilisés pour
développer le protocole
expérimental**



Peuplier, Biron (64),
prélèvements des barreaux
(en rouge > laboratoire Navier)



Douglas, Biron (64)
prélèvements des barreaux
(en rouge > laboratoire Navier)



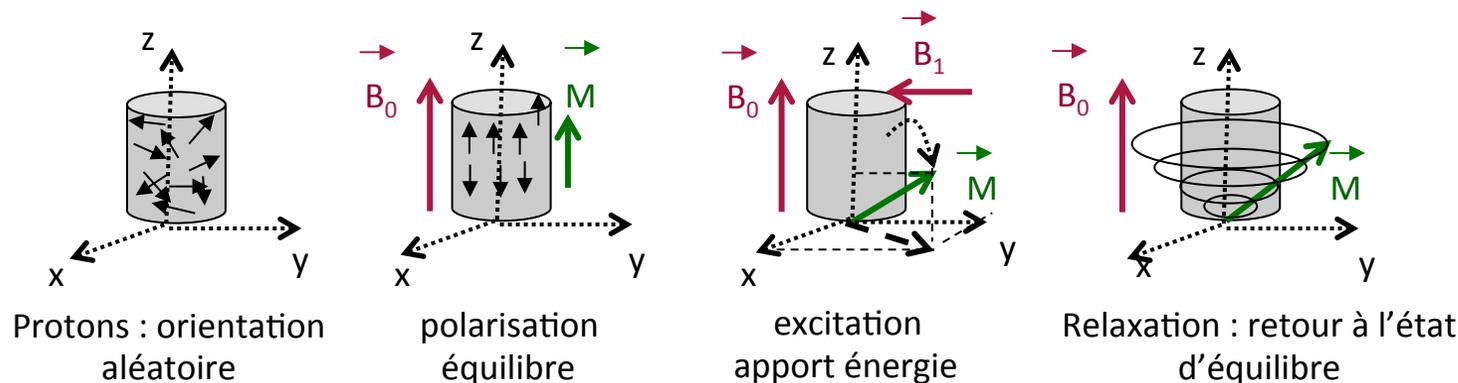
Sapin blanc, Giat (63)

(1) Caractérisation hydrique, échelle globale

Etude des transferts d'eau par spectrométrie ^1H RMN

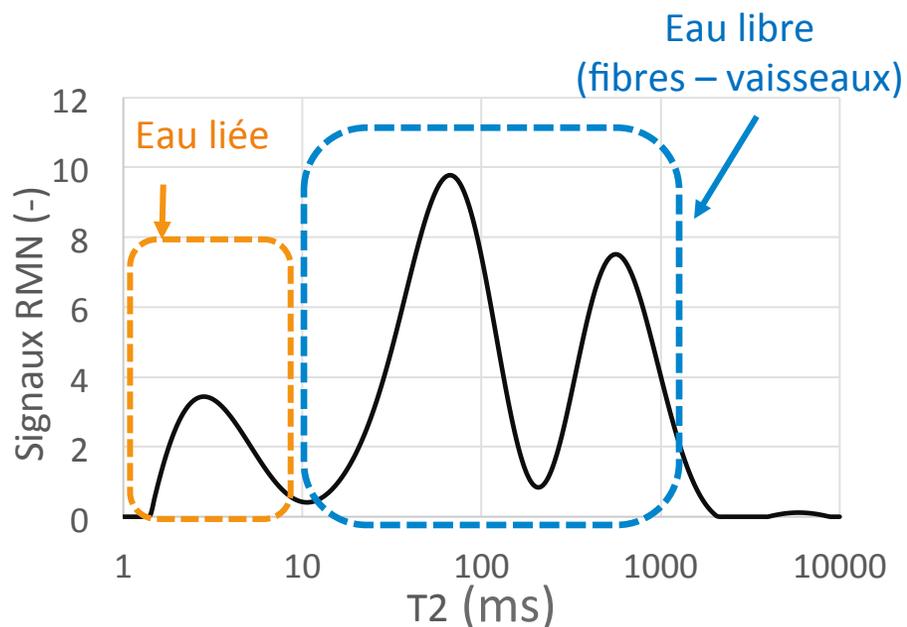
Participants :

Sabine Caré, Denis Courtier-Murias,
Benjamin Maillet, Philippe Coussot



- Signal RMN $\propto r$ (densité protonique)
- 2 temps intrinsèques au milieu : T_1 et T_2 (mobilité, environnement du proton)

Mesure GLOBALE (en volume)
(échantillon cm^3)



Exemple de spectre ^1H RMN pour le peuplier :

- Mesure du temps T_2 : 3 temps de relaxation associés à l'eau liée absorbée dans les parois cellulaires et l'eau libre dans les lumens des fibres et des vaisseaux
- Mesure de la quantité d'eau associée à chaque T_2 : aire sous le pic



Permet de caractériser et de quantifier les différents types d'eau dans le bois

(1) Caractérisation hydrique, échelle globale

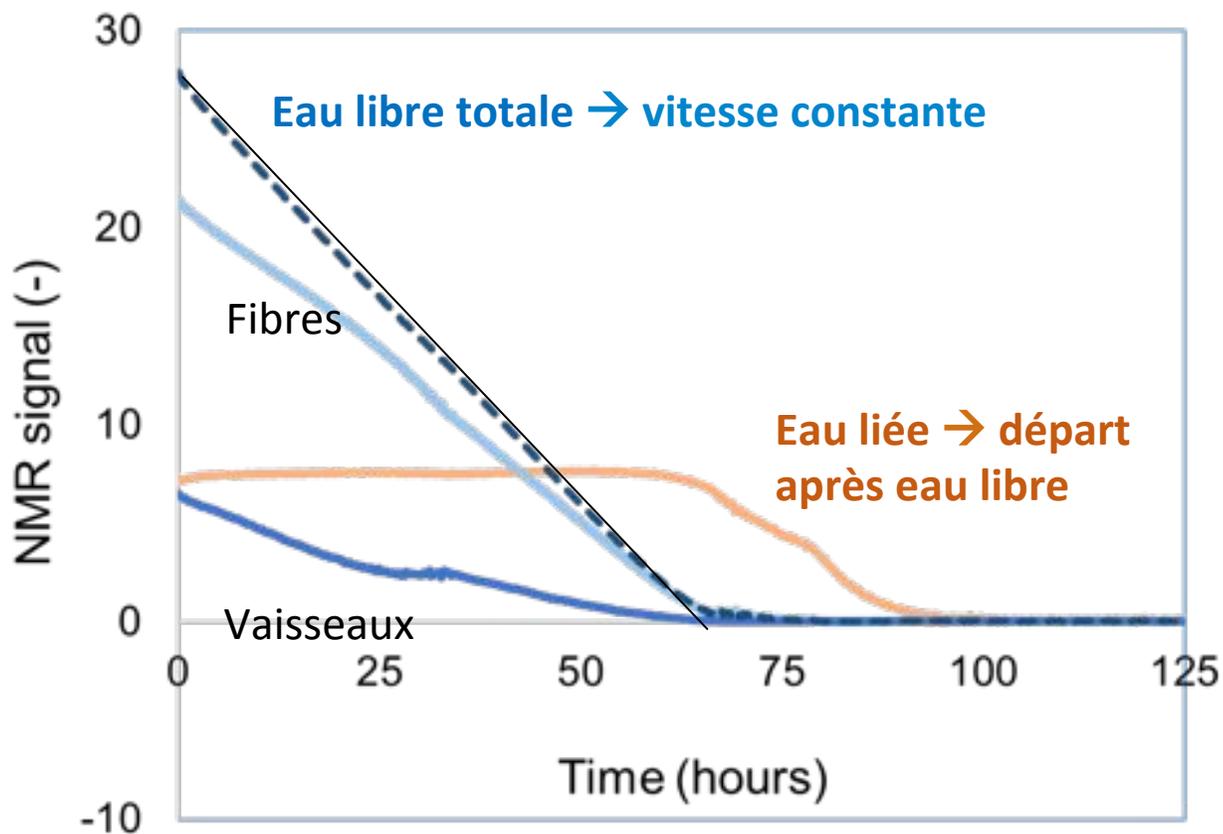
Exemple de résultats, peuplier P12 Biron, 1^{ère} désorption

- Identification des cinétiques de transfert en cours de séchage (à l'échelle de l'échantillon, mesure globale)
- Résultats similaires pour douglas D1 Biron et Peuplier Montpellier.

Flux air sec



Tube RMN



Interprétation (à confirmer pour HR élevée) :

- Vidange simultanée des fibres et vaisseaux (non classique pour un milieu poreux)
- A la surface, départ d'eau liée compensée par « aspiration de l'eau libre » des lumens --> quantité d'eau liée « constante » tant qu'il y a de l'eau libre

Perspectives :

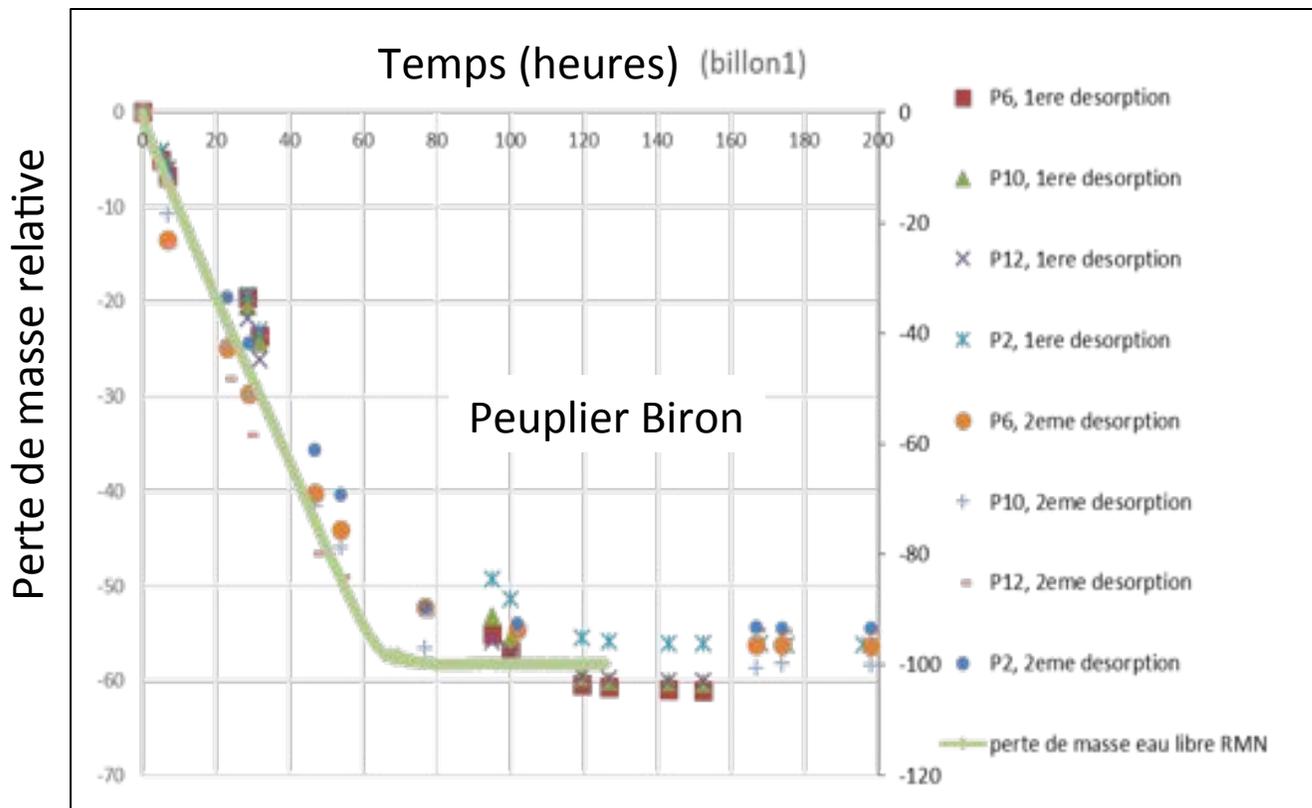
- Corréler aux déformations et pertes de masse
- 2^{ème} désorption à réaliser
- Etude sur des échantillons plus grands et analyse par Imagerie par Résonance Magnétique IRM à réaliser (profils)

(1) Caractérisation hydrique, échelle globale

Résultats perte de masse pour le peuplier de Biron vs données RMN

Perte de masse relative en fonction du temps (HR environ 50%)

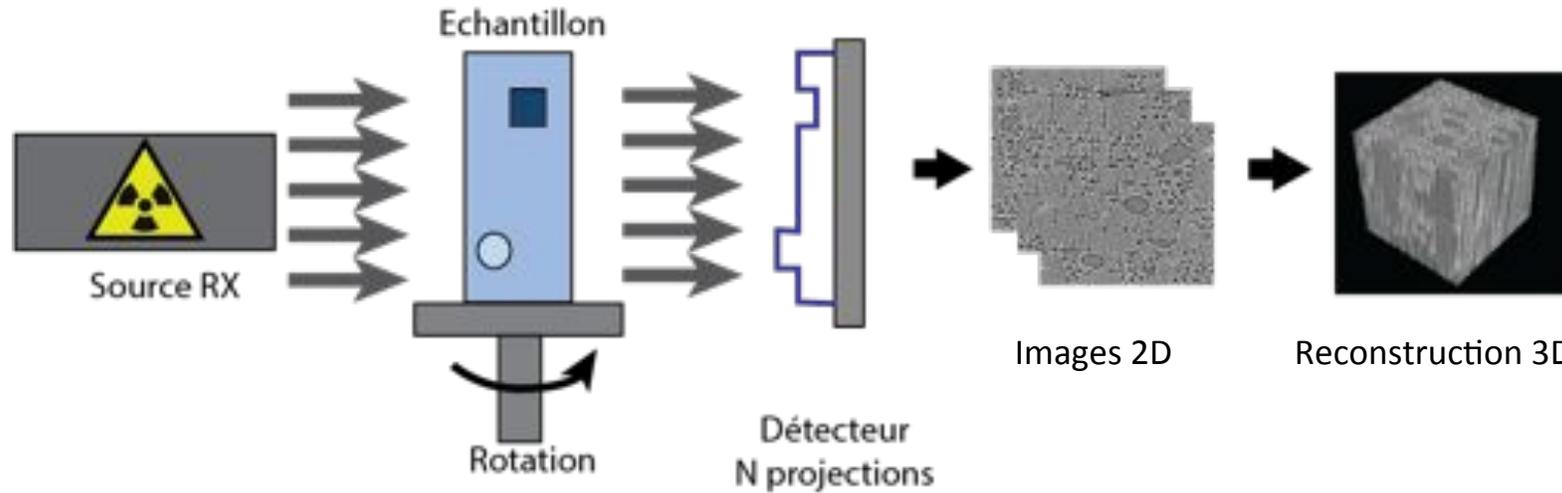
Peuplier, 1^{ère} désorption et 2^{ème} désorption après réimbibition



- Perte de masse via RMN (à flux de air sec) similaire à perte de masse à HR environ 50%
- Pas d'effet de la zone prélèvement dans le billon pour le Peuplier

(1) Caractérisation hydrique

Etude des transferts par tomographie aux rayons X



- 2min/image,
- voxel : 1.3 μm , Volume 2.6 mm^3

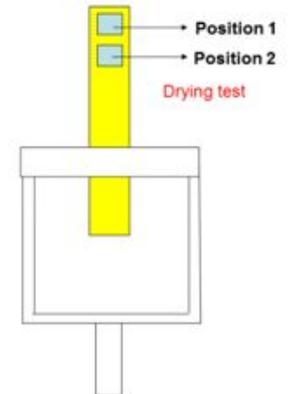
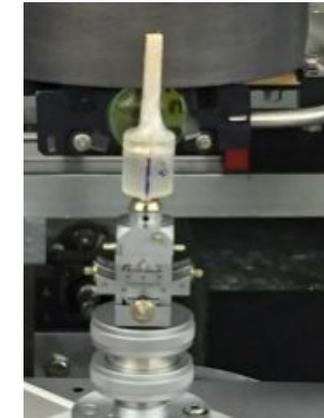


Mesure **LOCALE** (section
éprouvette : 3-4 mm)

Proposal Soleil (sept 2018) :

Ligne Anatomix (Scheel Mario, Perrin Jonathan, Weitkamp Timm)

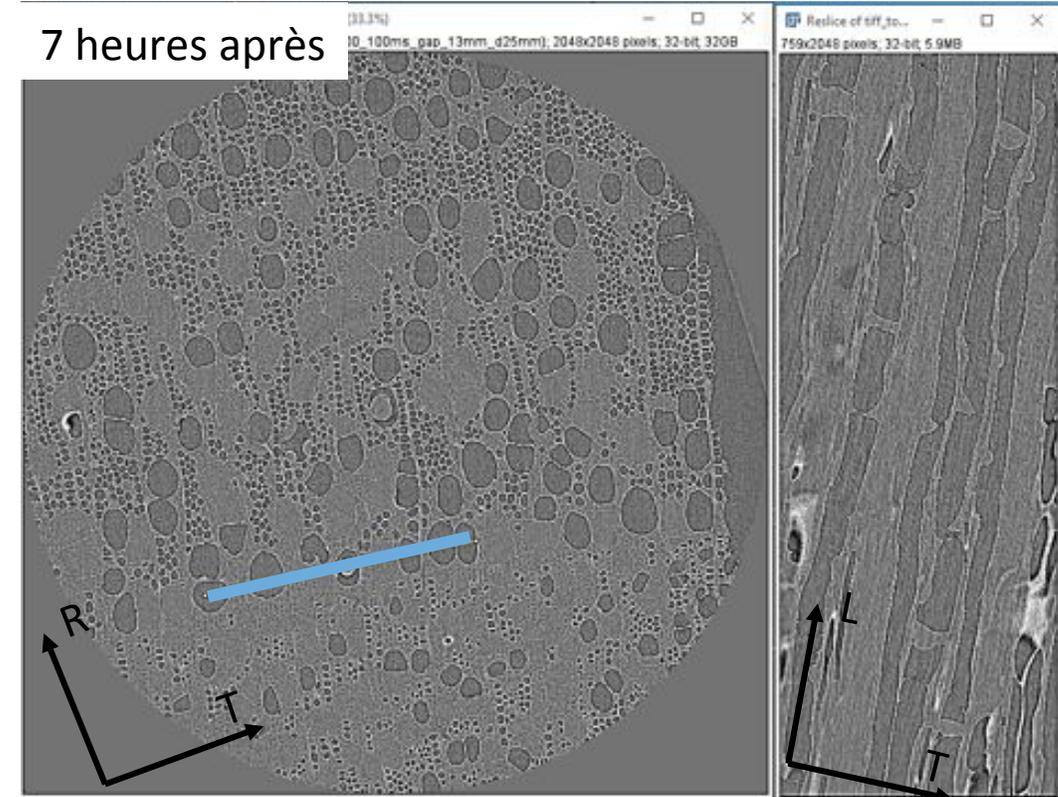
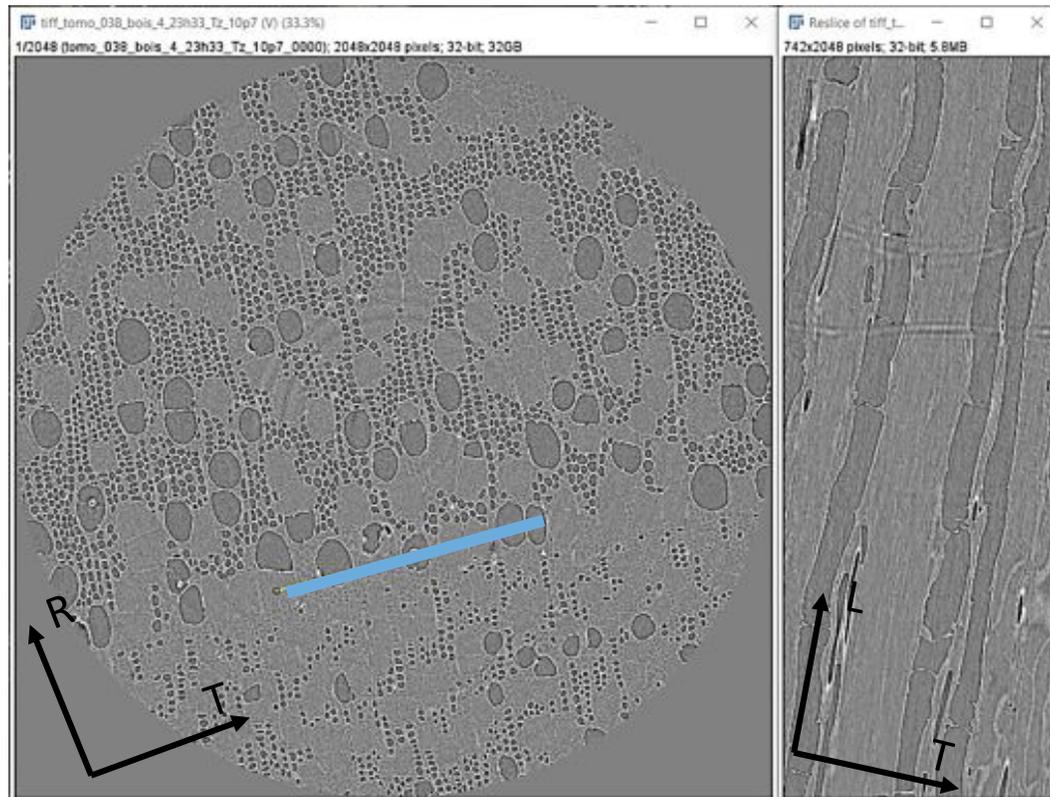
- Séchage de bois « sec » ré-imbibé ou de bois vert (ie jamais séché) – sur **douglas et peuplier à différentes échéances**
- Images statiques **pour différentes localisations dans les billons** (peuplier et douglas Biron et sapin blanc)



Mise au point d'un dispositif pour le séchage : petit récipient en impression 3D, avec des bouchons souples pour maintenir l'échantillon et permettre les variations de dimensions

(1) Caractérisation hydrique

Exemple de résultats, Séchage Peuplier Biron, P12 (HR = 50%)

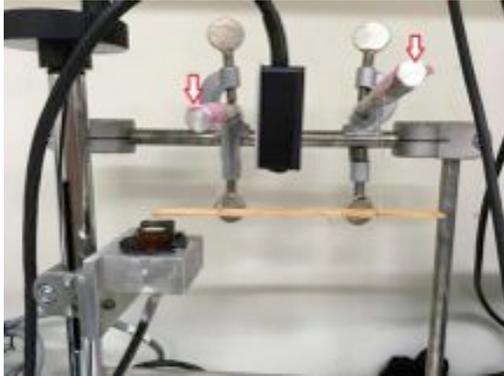


Analyse en cours

- Répartition eau liquide vaisseaux / fibres (fonction de la localisation dans les billons) + analyse quantitative en cours de séchage par analyse d'images (comparaison avec les données RMN)
- Mécanismes de séchage (bois vert à comparer avec bois sec « r eimbib e ») :
 - Interfaces air/eau vs angles de contact
 - Formations de gouttes en cours de séchage et vidange/ remplissage fibres vaisseaux à expliquer

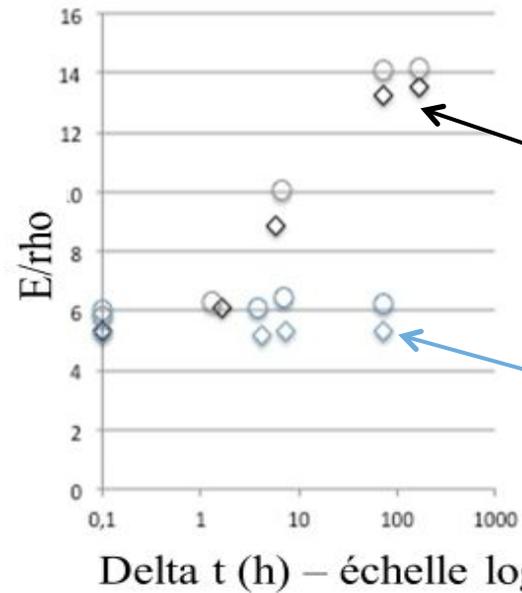
(2) Caractérisation mécanique

Mesures de la rigidité par méthodes vibratoires



Mesures de propriétés mécaniques (viscoélastiques) par **méthodes vibratoires**

- Module de rigidité longitudinal spécifique E_L/d
- Coefficient d'amortissement $\tan \delta$



Échantillons en cours de séchage à l'air ambiant

Échantillons maintenus à l'état vert

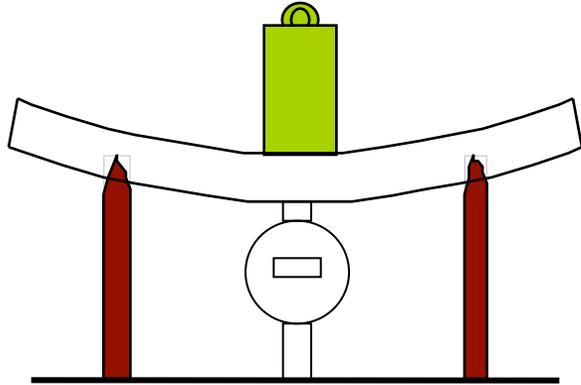
PEUPLIER	d	E_L/d (GPa)	$\tan \delta$
Bois vert	1,07	5,4	$2,45 \cdot 10^{-2}$
Bois sec à l'air	0,5	13,2	$1,29 \cdot 10^{-2}$

Evolution des valeurs de modules spécifiques pour les échantillons de bois, humide ou au cours du séchage.

(2) Caractérisation mécanique

Mise au point d'un dispositif de fluage avec ambiance contrôlée

Fluage = charge constante, mesure de la déformation au cours du temps



Zoom sur la jauge de déformation placée au centre de l'échantillon

$$\epsilon_{\text{hydrique}} = \frac{\epsilon^+ - \epsilon^-}{2}$$

$$\epsilon_{\text{visco}} = \frac{\epsilon^+ + \epsilon^-}{2}$$

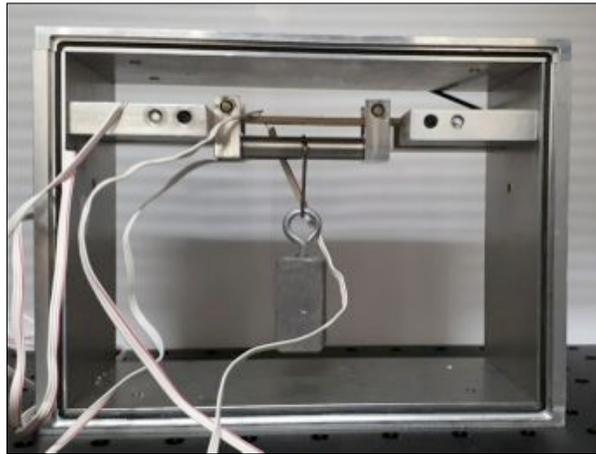


Mis au point d'un nouveau ban de fluage, Juin 2019 :

Système simple

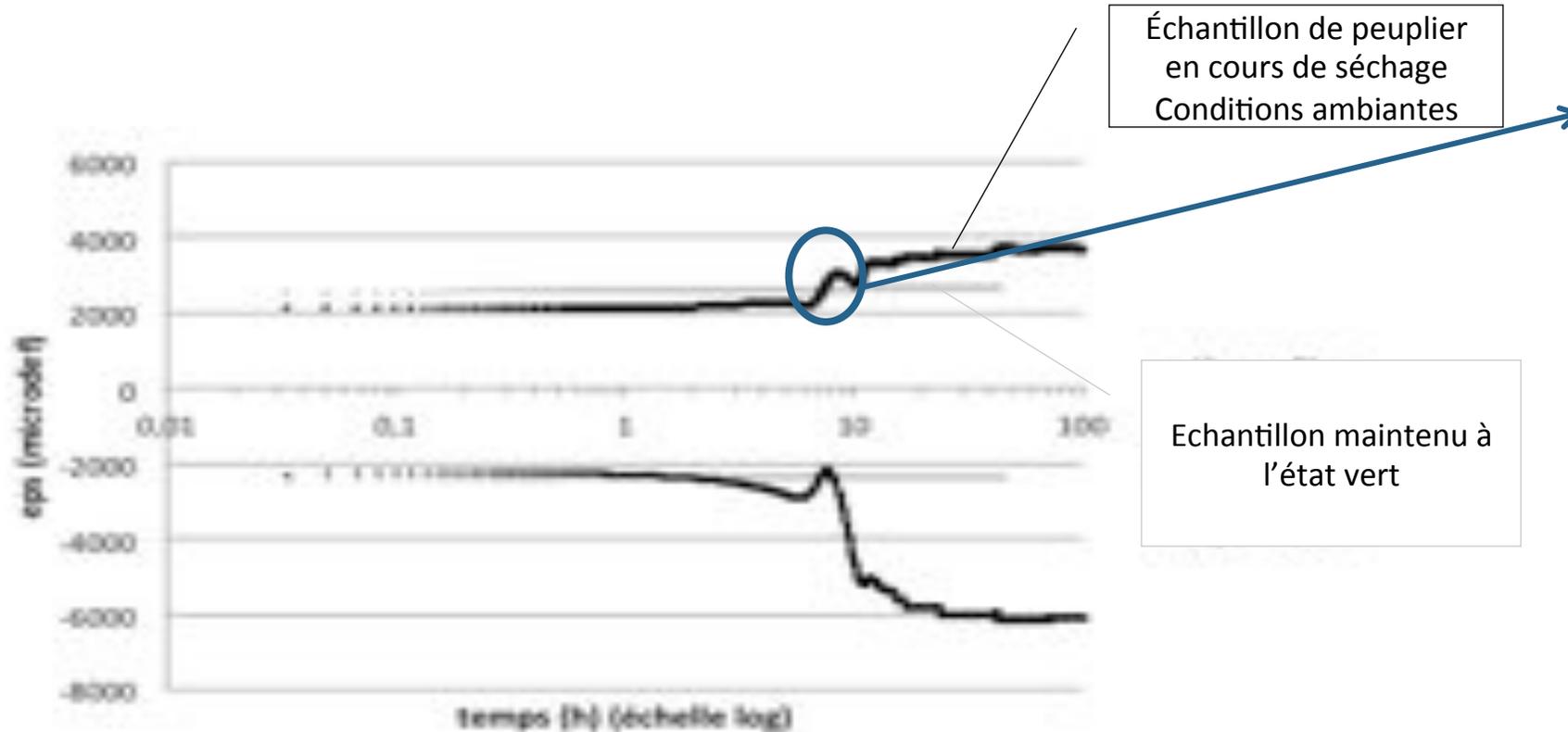
Répétable en plusieurs exemplaires

Peu encombrant (enceinte climatique, pièce régulée ou non régulée...)



(2) Caractérisation mécanique

Exemple de résultats



Observation :

- Saut de la déformation : départ de l'eau liée ?

Perspectives :

- Corréler les résultats mécaniques et le suivi de masse
- Comparer avec un échantillon sec soumis à des variations d'humidité relatives

Evolution des valeurs de déformations sur chaque face d'un échantillon de peuplier, enrobé de parafilm ou à l'air

Conclusions - perspectives

Mise au point de protocoles et de méthodes d'investigation

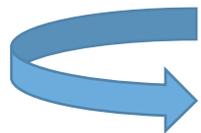
- Echantillonnage
- Développement d'expérimentations adaptées à l'étude du bois vert pour les caractérisations hydriques et mécaniques

Résultats

- Cinétiques de séchage et mécanismes à l'échelle des cellules à HR 50%
- Fluage semble corrélé au type d'eau qui part
- Isothermes de sorption et effets induits sur les déformations, en fonction des prélèvements des échantillons (non présentés ici)

Perspectives à l'échelle macro

- Assemblage
- Etude sur des échantillons décimétriques
 - * profils hydriques (IRM)
 - * Fluage
- Modélisation



Autre essence à investiguer : Chêne (rénovation)

STAGES MASTER / THESES :

· **Paule Durin, M1 (2018)** : Caractérisation hydrique et mécanique du bois vert

Sylvain Conte, M1 (2019) : développement de nouveaux dispositifs pour la mesure du fluage du bois vert et des propriétés hydriques

Tai-Yun TSHIEH, Doc, (2019-2022) : Relations structures/propriétés à l'origine des comportements différés des bois –
de la compréhension des mécanismes à la détermination d'indicateurs prédictifs.

Etudiant Polytech, PIFE, (2020) : Comportement en fluage du bois vert sous séchage : historique des méthodes constructives, études expérimentales et modélisation rhéologique en vue d'une application en construction.

THESES :

Nihal Ghanem (2018-), Optimisation des structures en bois en fonction de l'humidité

Leila Rostom (2017-), Effets des traitements thermiques modérés sur le vieillissement physique du bois et sur ses propriétés hygro-mécaniques

Meng Zhou (2015- 2018), Compréhension des mécanismes de transferts de liquide dans le bois

Marie Bonnet (2014-2017), Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne

Louisa Loulou (2009- 2013), Durabilité de l'assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique.

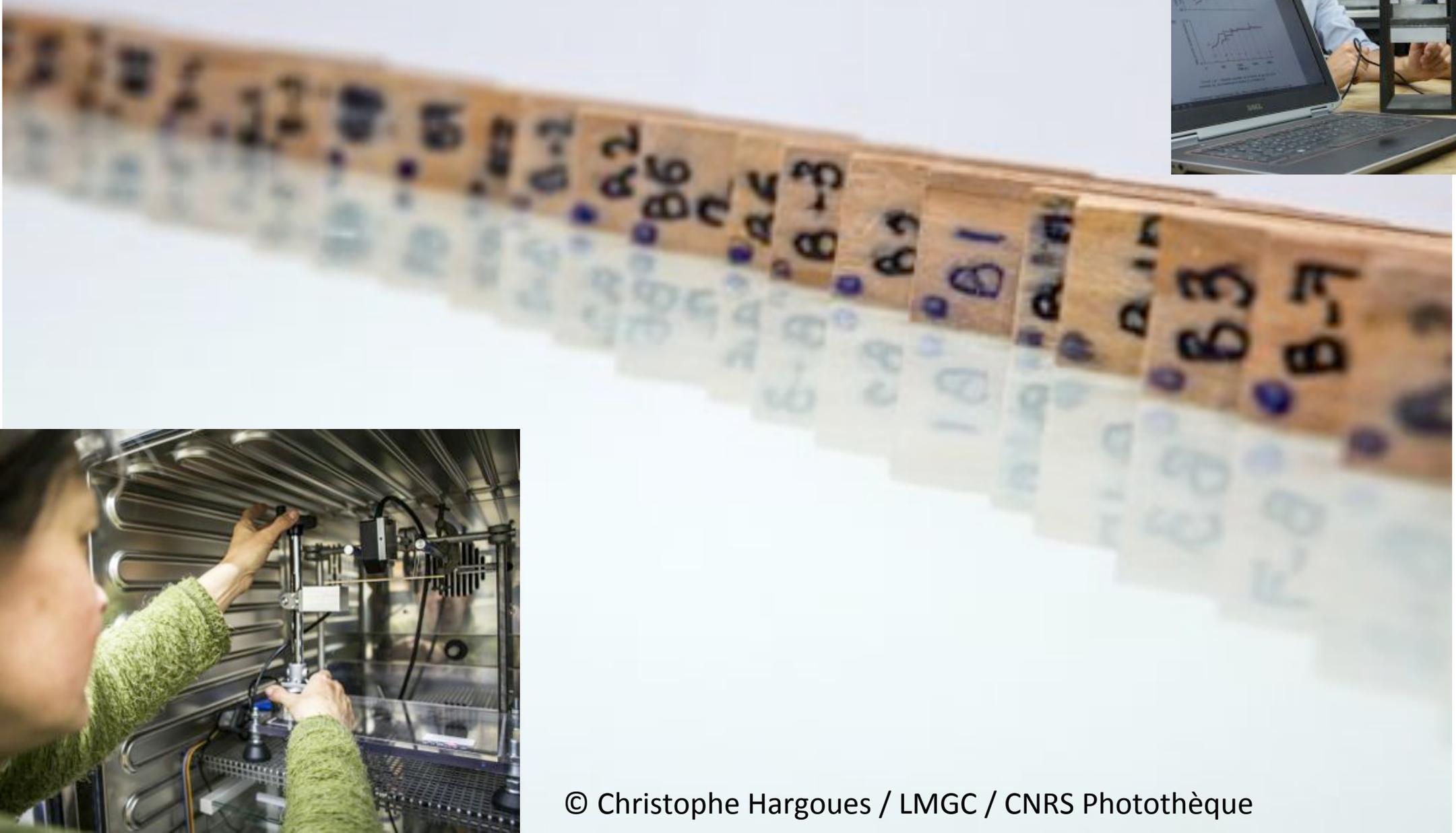
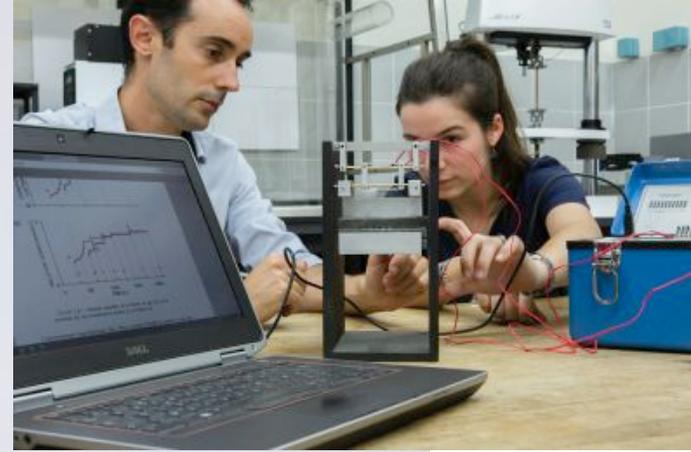
ARTICLES :

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

T. A. N'Guyen; N. Angellier; S. Caré; L. Ulmet; F. Dubois, (2017) **Numerical and Experimental Approaches to Characterize the Mass Transfer Process in Wood Elements** - Wood Science and Technology 51(4), 811-830.

M. Zhou, S. Caré, D. Courtier-Murias, P. Faure, S. Rodts, P. Coussot, (2018) **Magnetic resonance imaging evidences of the impact of water sorption on hardwood capillary imbibition dynamics** , Wood Science and Technology, v.52 no.4 pp. 929-955.

Merci pour votre attention

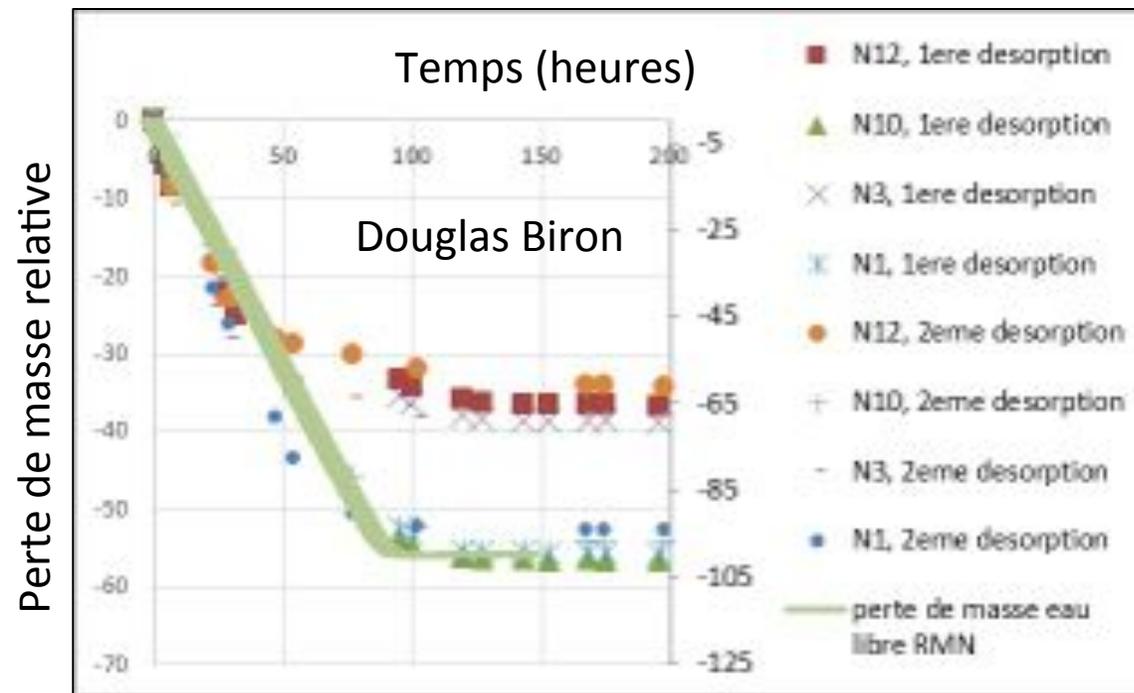
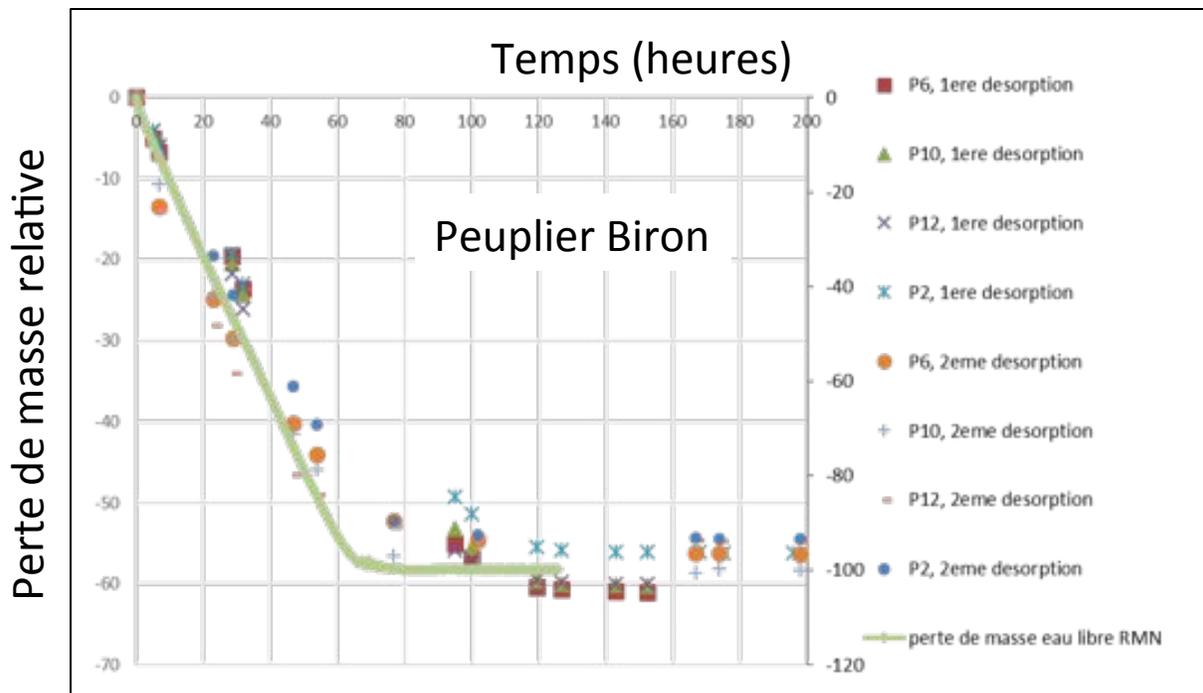


(1) Caractérisation hydrique, échelle globale

Résultats perte de masse pour le peuplier de Biron vs données RMN

Perte de masse relative en fonction du temps (HR environ 50%)

Peuplier, 1^{ère} désorption et 2^{ème} désorption après réimbibition



- Perte de masse via RMN (à flux de air sec) similaire à perte de masse à HR environ 50% ! Eau liée qui contrôle le processus? Pas d'effet du prélèvement dans billon pour le peuplier !
- Quid si séchage à HR élevée ?