

CUPIDON SUR LE GRIL

MICHAUD Franck¹, AZAGURY Bohémond², BIYANDZA DJOURI Pierre-Lévi², BOIDIN Kevin², CHAGNEAUD Tom², FAURE Erwan², FRASCO Lina², GRENIER Thomas², DE SOUZA ILENICH Luana², ITONET BOUENI Clathy², LAFARGUE PUDAL Marie², MALLE Maxime², MAZZONETTO Antoine², MOUJAHID Leina², POUPON Martin², SILVESTRI Fanny², VAUBOURG Milo²

¹LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois

²Ecole Supérieure du Bois

franck.michaud@esb-campus.fr

Mots clefs : thermocompression ; hygroscopie ; effet mémoire ; bois massif ; anisotropie ; pédagogie ; rhéologie

Contexte et objectifs

L'apprentissage des sciences du bois est souvent compliqué voire complexe du fait même des particularités de ce matériau (anisotropie, hygroscopie, porosité, variabilité, hétérogénéité, multi-échelles...). C'est probablement pour cela que ce matériau est assez peu enseigné ou peu pris en exemple dans les enseignements classiques de physique, mécanique ou chimie. Pourtant c'est un formidable challenge pour ceux qui aiment les sciences, ceux qui aiment le bois ou les deux à la fois.

Une question posée est donc : « Comment proposer une expérience pédagogique ludique, riche, interactive permettant d'appréhender le comportement du matériau bois en intégrant nombre de ses spécificités ? ».

L'inspiration est venue du Dr Joseph GRIL, qui à l'occasion de journées du GDR a présenté les travaux d'Inoue et al (1992) sur la flèche de Cupidon. C'est autour de la réalisation de cet objet qu'a été construit et réalisé le cours électif de sciences du bois avancés de la formation ingénieur de l'Ecole Supérieure du Bois en mai 2025. L'exercice s'est déroulé sur 4-5 jours avec un groupe d'une quinzaine d'étudiants au sein des laboratoires et de l'atelier. L'approche pédagogique est de type « apprendre par l'expérimentation » sous la forme d'un défi qui permet de considérer et combiner :

- Les sciences : anatomie du bois, choix des essences, orthotropie du matériau ; comportement mécanique, rhéologie et chimie du bois ; conception, usinage, traitement hygrothermique, thermocompression,
- Les intérêts ou motivations des apprenants : autonomie dans l'organisation, concevoir et réaliser, approche esthétique, technologique, scientifique, la théorie en appui concret d'un projet pratique, approfondissement de la connaissance du matériau bois, une finalité matérialisée.

Démarche expérimentale et pédagogique

Compte tenu du contexte et des objectifs, le processus pour aboutir à une réalisation dans le temps imparti a consisté à adopter une démarche itérative correspondant à la répétition de phases successives. Trois thématiques ont été traitées simultanément, à savoir une approche théorique globale du comportement du bois, une approche technologique de la mise en œuvre de l'objet et des étapes de sa transformation, et enfin une approche de choix et d'observation

anatomiques des essences de bois avant et après traitement. Pour chaque itération les trois tâches sont :

- Analyse des connaissances
- Définition d'un protocole d'essai et réalisation technique
- Observations, analyse des résultats et du comportement du bois

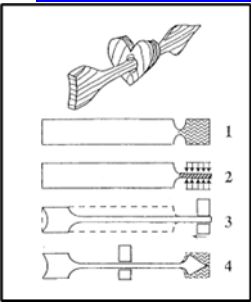
Chronologiquement, voici les méthodes et les éléments essentiels de chacune des itérations.

Matériels mis à disposition. Les étudiants disposent spécifiquement de :

- Bain-marie pour l'immersion (ambiant-99°C), étuve, machines d'usinage du bois
- Presse hydraulique manuelle à plateaux chauffants (20 tonnes, ambiant à 200°C)
- Hygromètres, balances de précision, pied à coulisse,
- Echantillons de différentes tailles et débits (dosse, quartier, faux quartier) des espèces de bois (choisies parmi un grand panel disponible) : Hêtre, Douglas, Peuplier, Sapin, Frêne, Robinier, Epicéa, Sapelli, Movingui.
- Equipements de macroscopie et microscopie optique

Approche théorique. Le Tab.1 résume le cheminement théorique à travers les sources consultées et leur « analyse ».

Tab. 1 : Revue incrémentale de la littérature sur le sujet de la flèche de Cupidon

Itération	Sources	Eléments clés
1	<p>Sur la base des schémas d'Inoue et al et de la conférence de J. GRIL. (fournis)</p>  <p>d'après Inoue et al (1992)</p>	<p>Effet plastifiant lié à l'humidité (H) et la température (T) du bois</p> <p>Etapes successives du processus (usinage, compression, usinage, gonflement, usinage)</p> <p>Rôle de l'orthotropie et du plan ligneux (homogénéité, porosité)</p> <p>Rôle des essences</p>
2	<p>Gril et al (2016), Gong et Lam (2007) Kutnar et al (2007, 2012) Navi et al (2004)</p> <p>Approfondissement de la revue aux procédés de densification ou THT sur le bois.</p>	<p>Géométrie et orientation de la pièce de bois (notion de nid d'abeille, déversement)</p> <p>Taux de compression (à limiter)</p> <p>Condition de reprise dimensionnelle (effet mémoire), notion de compression set (déformation résiduelle)</p>
3	<p>Salmen (1982), Fengel (1984), Kelley et al (1987), Winandy et Rowell (2005), Rowell (2012)</p> <p>Approfondissement de la revue aux comportements des hémicelluloses, de la lignine.</p>	<p>Comportement des différents constituants du bois selon conditions (minimiser les contraintes), notion de Tg dépendante de H.</p> <p>Dynamique de la transformation (vitesse de compression, de perte ou reprise d'humidité).</p>

Approche expérimentale et technique. La définition des paramètres fonctionnels n'est pas une optimisation mais bien le fruit à la fois d'un travail d'essai-erreur corrigé par les données de la littérature, des hypothèses proposées par les étudiants et des observations des expériences. Ce travail a abouti en partant de la figure d'Inoue et al (1992) aux éléments du Tab. 2 : dans un

premier temps l'objet de chaque étape, puis finalement un protocole final fonctionnel reproductible permettant d'atteindre l'objectif de réalisation d'une flèche de Cupidon.

Tab. 2 : Description des étapes du processus de transformation du bois

Process	Nom	Attentes	Paramètres fonctionnels
Etape 1	Choix du matériau	Capacité à se déformer Capacité aux transferts de chaleur et humidité Rectitude de l'orientation des fibres Homogénéité du plan ligneux	<i>Picea abies</i> Section 50x50 mm Coupe sur dosse (compression radiale)
Etape 2	Ramollissement du bois	Comportement du bois en fonction de la teneur en eau Effet de la température et du temps sur la plastification	Immersion à 95°C dans l'eau pendant 12h
Etape 3	Thermo-compression	Limitation de la contrainte appliquée (en fonction du temps et de la température) Taux de compression cible inférieur à 50%	Cycle de thermocompression Température initiale des plateaux 200°C, de 160°C après 15 min puis 100°C à 60 minutes. Taux de compression de 40% en 15 minutes (environ 0,2 à 0.3 MPa à 1,3 mm.min ⁻¹). Refroidissement libre après 1h.
Etape 4	Reprise dimensionnelle	Confinement du gonflement (à une zone préalablement comprimée) Cinétique de la dynamique de gonflement en fonction de la température et la durée	Immersion de la zone visée (entaille pour délimiter et limiter la diffusion au-delà) à température ambiante pendant 30 minutes (stabilisation) puis montée en température jusqu'à 100°C (stabilisation) Refroidissement à l'air libre
Étapes intermédiaires	Usinage entre chaque étape	Débit, Mise aux dimensions, Rainurages, Finition, Mise en forme	Préparation du cœur en <i>Quercus sp.</i> , Insertion de la flèche dans le cœur entre les étapes 3 et 4

Observations

Un certain nombre d'essences a été observé au microscope à partir de coupes réalisées au microtome. L'évolution des éléments anatomiques a été scrutée pour détecter les variations entre l'état initial (*indiqué par l'indice a0*), l'état saturé (a), l'état comprimé (b) et l'état « re-saturé » après reprise des déformations de compression (c). Les Fig. 1 et 2 montrent que pour les feuillus ce sont principalement les vaisseaux et lumens qui « absorbent » les déformations. Le retour de ces déformations s'opère assez bien. Néanmoins la localisation des éléments déformés reste peu homogène.

La Fig. 3 correspond à une essence de résineux qui montre un fort potentiel de compression radiale et de reprise de forme maîtrisée. En effet le plan sollicité radialement est très homogène (dans chaque section sollicitée) ce qui rend possible une compression dans l'axe radial importante avec aussi des glissements. Le retour à l'état ambiant a induit une relaxation mécanosorptive (limitation de l'effet ressort). La reprise d'humidité (T proche de 100°C) libère les contraintes et le recouvrement est important (hors déformation résiduelle *ou plastic compression set*).

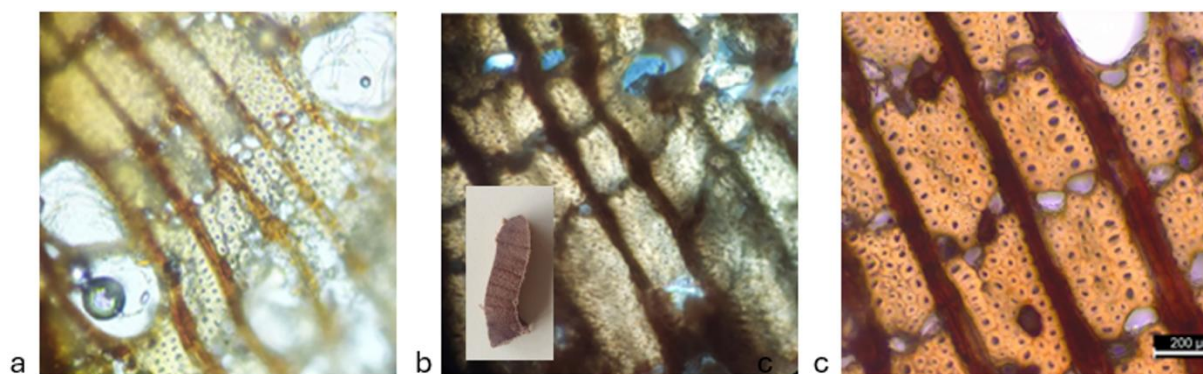


Fig. 1 : Coupes anatomiques de SAPOTACEAE de l'état initial saturé (a) à la reprise saturée (c) après compression (b)

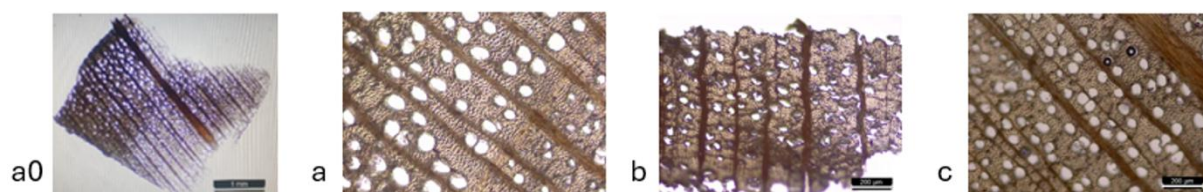


Fig. 2 : Coupes anatomiques de *Fagus silvatica* de l'état initial (a0) à la reprise saturée (c) après une première saturation (a) puis compression (b)

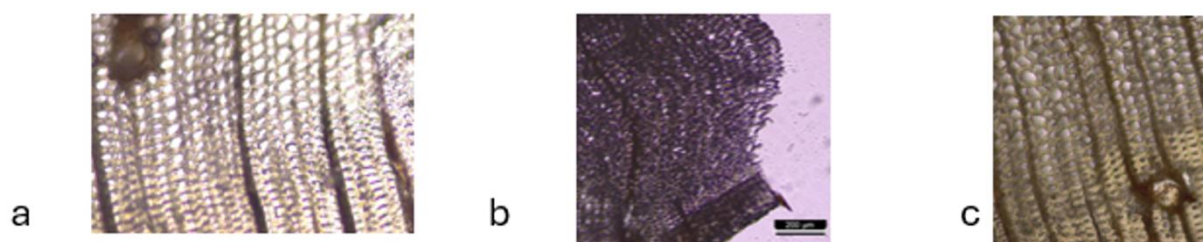


Fig. 3 : Coupes anatomiques de *Pinus pinaster* de l'état initial saturé (a) à la reprise saturée (c) après compression (b)

Discussion (retour d'expérience)

Pour chaque thème, des éléments essentiels (non exhaustifs) ont été relevés et restitués permettant d'améliorer la maîtrise du comportement des essences de bois, et la capacité à l'appliquer à la réalisation d'une transformation du bois en objet.

La Fig. 4 est une synthèse très schématique du comportement thermo-hygro-mécanique du bois, en fonction de ses constituants. Cela permet ainsi de faire le lien entre l'échelle moléculaire et l'échelle du matériau, de mieux appréhender la rhéologie et les conditions qui favoriseront la transformation du bois. Lors de notre procédé, l'étape de thermocompression est cruciale et fait intervenir des conditions (σ , H, T) qui varient au cours de l'essai et au sein de la pièce sollicitée (notion de gradient). La surface en contact démarre à 200°C alors que le cœur est saturé à 95-100°C. Il apparaît judicieux de maintenir le bois au cours de la compression soit à une température suffisante ($>150^{\circ}\text{C}$) pour de faibles humidités ou très saturé à de plus faibles températures pour bénéficier de l'effet plastifiant (et prévenir ou limiter les fissurations, collapses...). Les 15 minutes de l'essai fonctionnel respectent assez bien cette plage de condition et la possibilité de se situer au-delà de la transition vitreuse (T_g), variable selon H.

Au niveau anatomique, l'épicéa présente une homogénéité importante dans la section sollicitée par une compression axiale et donc une orthotropie locale « idéale », une densité faible induisant une grande porosité bien distribuée (structure nid d'abeille). Le gradient radial entre bois initial et final facilite le transfert de contrainte sans rupture.

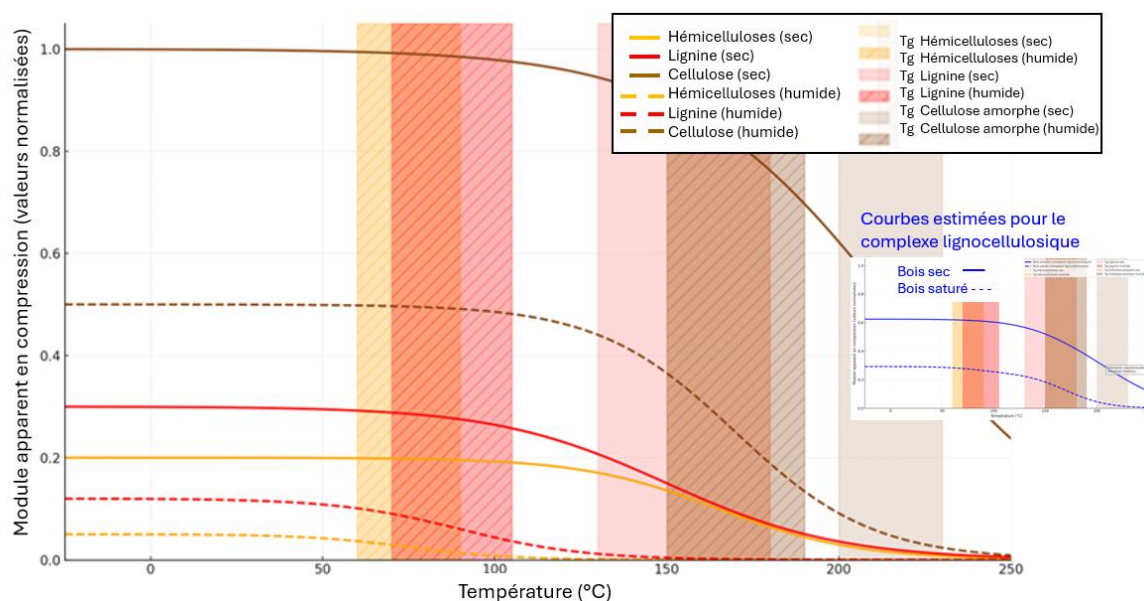


Fig. 4 : Schématisation du comportement thermo-hygro-mécanique des constituants principaux du bois en fonction de la température (état sec ou anhydre, état humide ou saturé).

Approche expérimentale et technique. Au niveau technique, la Fig. 5 rend compte des paramètres de l'étape de thermohydrocompression (déformation contrainte), la Fig. 6 relate l'historique de compression. La Fig. 7 rend compte des changements d'état d'une flèche en partant du bloc saturé, comprimé (observation en B des glissements des couches comprimées par cisaillement roulant). L'image D montre comment la zone comprimée a repris sa forme initiale. L'immersion par l'extrémité s'observe par un gonflement inégal mais graduel, corrélé à la diffusion de l'eau chaude au sein du matériau.

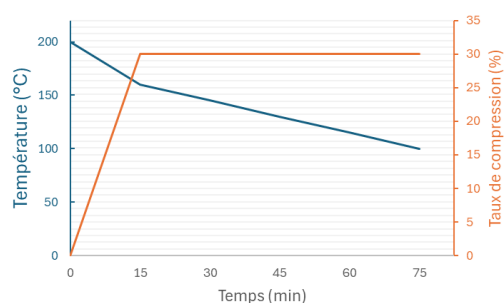


Fig. 5 : Paramètres de thermocompression du bois préconditionné (saturé à chaud), température (surfaces), durée et taux de compression appliqués

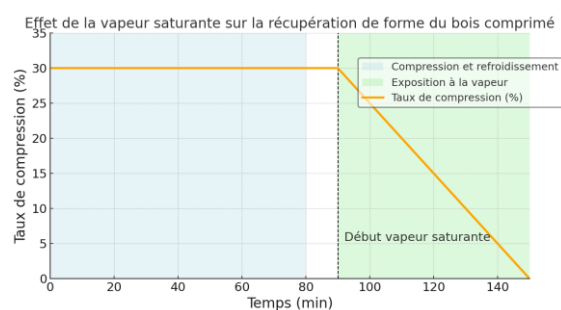


Fig. 6 : Allure schématique du taux de compression des échantillons de la sortie de la thermocompression à la reprise en volume par gonflement sous vapeur saturante

Conclusion et perspectives

La réalisation d'une flèche de Cupidon en bois (Fig. 8) par un groupe d'élèves ingénieur en mode projet constitue un défi pertinent pour appréhender un travail transdisciplinaire d'apprentissage scientifique et technique sur le matériau. L'objectif du livrable, l'essai-erreur et le temps limité favorise un approfondissement progressif de la connaissance du matériau et son comportement. L'observation continue de phénomènes attendus, espérés ou surprenants renforce l'approche alternée pratique & théorique. Le résultat valorise les efforts consentis.

Cet exercice répond à l'injonction : « Aimer les sciences avec le bois et réciproquement ! »

Remerciements

Merci à Joachim POIRIER pour son accompagnement à l'atelier bois.

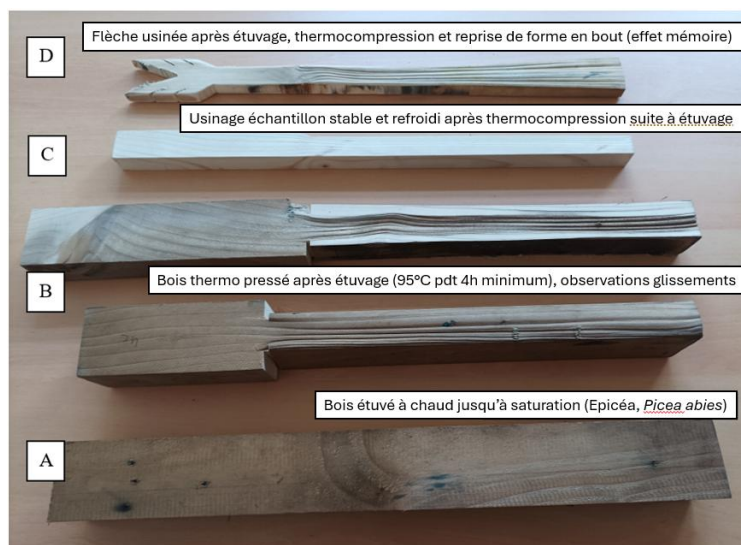


Fig. 7 : Observations des transformations successives du bois (*Picea abies*) de l'étuvage à la reprise de forme en passant par la thermocompression



Fig. 8 : Flèche de Cupidon réalisée par les étudiants ESB, mai 2025 (environ 30cm)

Références

- Backman M, Lindberg KAH (2001) Mechanical behavior of wood and fibre-based materials at elevated temperatures, *Holzforschung*, 55(5), 521–529.
- Fengel D, Wegener G (1984) *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*.
- Gong M, Lam F (2007) Thermo-hydro-mechanical densification behavior of aspen wood.
- Gril J, Jullien D, Hunt D (2016) Compression set and cupping of painted wooden panels. Analysis and Characterisation of Wooden Cultural Heritage by Scientific Engineering Methods, Apr 2016, Halle (Saale), Germany. hal-01452161f.
- Inoue M, Aoki T, Egawa G (1992) Development of a new teaching material utilizing recovery of compressive set of wood, *Wood Research and Technical Notes*, Kyoto University, 28.
- Kelley SS, Rials TG, Glasser W. G. (1987) Relaxation behavior of the amorphous components of wood, *Journal of Materials Science*, 22(2), 617–624.
- Kutnar A, Kamke FA (2012) Form recovery in viscoelastic thermal compression (VTC) wood, *Holzforschung*.
- Kutnar A, Šernek M (2007) Densification of wood by thermo-hydro-mechanical process.
- Navi P, Heger F (2004) Combined experimental/numerical approach for viscoelastic behaviour and shape memory of wood in THM conditions, *Wood Science and Technology*
- Rowell RM (ed.) (2012) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, 2nd ed., CRC Press.
- Salmén L (1982) Temperature and moisture dependence of mechanical properties of wood. *Nordic Wood Research*, 34(1), 1–26.
- Winandy JE, Rowell RM (2005) *The Chemistry of Solid Wood*, in *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, CRC.