



L'ère du bois

Olympiades de Physique France

Janvier 2020

CASTEIGTS Marie, CHALONY Manon, DUCHESNE Léo et JOUBERT Pauline

Encadrés par Eric MATHIEU et Olivier POLIDORO

Lycée général et technologique Vauvenargues,

60 Boulevard Carnot, 13625 Aix en Provence

Résumé

Les bois délignifiés ont des propriétés remarquables et sont l'objet de nombreuses recherches récentes.

Nous avons dans ce projet commencé par étudier la structure du bois naturel.

Nous avons ensuite délignifié du bois naturel par un premier procédé et obtenu un bois blanc, puis compressé ce bois. Une étude de leurs propriétés physiques nous a confirmé que ces bois présentent un grand intérêt pour conserver une température fraîche à l'intérieur d'une maison, permettant un meilleur confort ou des économies d'énergie sur la climatisation. Nous projetons d'en étudier les propriétés acoustiques dans un laboratoire de recherche.

Nous avons ensuite délignifié du bois par deux autres méthodes, puis fabriqué un bois translucide en y injectant un polymère transparent. Ce bois présente un grand intérêt pour la diffusion de la lumière tout en étant un meilleur isolant thermique que le verre.

Sommaire

Résumé	p2
Sommaire.....	p3
Naissance du projet.....	p4
Le Bois.....	p5
Bois sans lignine.....	p6
Bois blanc et bois compressé.....	p7
Bois blanc.....	p11
Bois transparent.....	p14
Applications et conclusion.....	p16
Bibliographie et remerciements.....	p17
Images.....	p18

Naissance du projet

L'an dernier, lorsque nous étions en classe de seconde, notre professeur de physique chimie, Mr MATHIEU, nous a parlé des Olympiades de Physique, sujet qui nous a tout de suite beaucoup intéressés.

Marie est rentrée de vacances avec un bref entrefilet issu du magazine « Sciences et Avenir » à propos d'un bois blanc aux propriétés isolantes révolutionnaires développé récemment par une équipe de chercheurs du Maryland.

Tout de suite emballés, nous nous lançons le défi de participer aux Olympiades de Physique 2019. Nous commençons donc nos recherches sur ce mystérieux bois blanc et découvrons parallèlement l'existence du bois transparent.

Plusieurs objectifs se dégagent alors : fabriquer du bois blanc et du bois transparent, étudier leurs propriétés physiques, examiner les applications et pourquoi pas innover...



Le bois

Le bois est utilisé depuis des siècles dans la construction, mais il fait un come-back surprenant de nos jours. En effet, non seulement les projets de gratte-ciel ou de maisons éco responsables en bois se multiplient, mais le secteur de l'ameublement est aussi touché.

Ce matériau, d'origine végétale, a des propriétés mécaniques intéressantes, bien qu'elles ne soient pas suffisantes pour de nombreuses structures et applications d'ingénierie avancée.

Le bois est constitué d'un tissu végétal qui peut être homoxylé ou hétéroxylé. Un tissu hétéroxylé est composé de fibres, elles-mêmes composées principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

La cellulose est un polymère naturel et un glucide très résistant, contenu dans les parois cellulaires des plantes. Malgré sa taille son ratio poids/force est très élevé.

L'hémicellulose est aussi un biopolymère, constitutif de la paroi cellulaire végétale. Elle a un rôle de pontage entre les fibres de cellulose.

La lignine qui sert de ciment entre la cellulose et l'hémicellulose, produit des rayonnements infrarouges, et est par conséquent un bien mauvais isolant. Elle est à l'origine de la solidité et de la couleur du bois.

Pour fabriquer nos bois modifiés, il est nécessaire de procéder tout d'abord à une délignification.

Fig.2

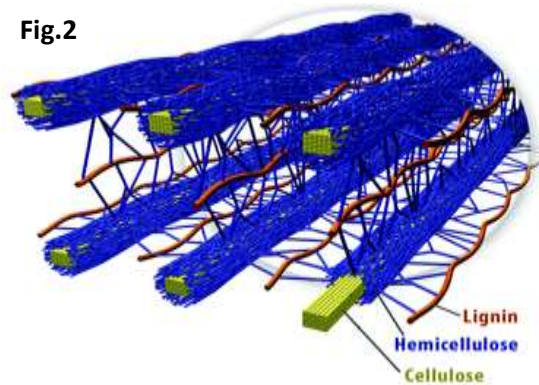


Fig.3

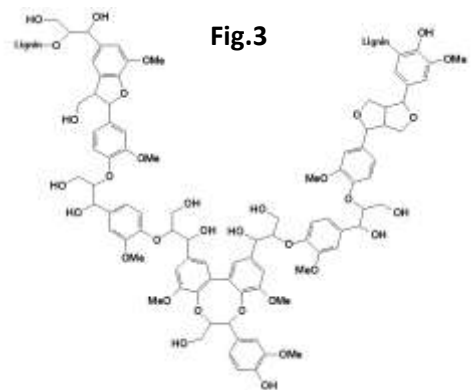


Fig.4

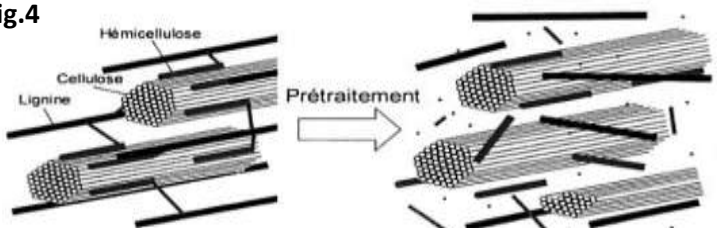
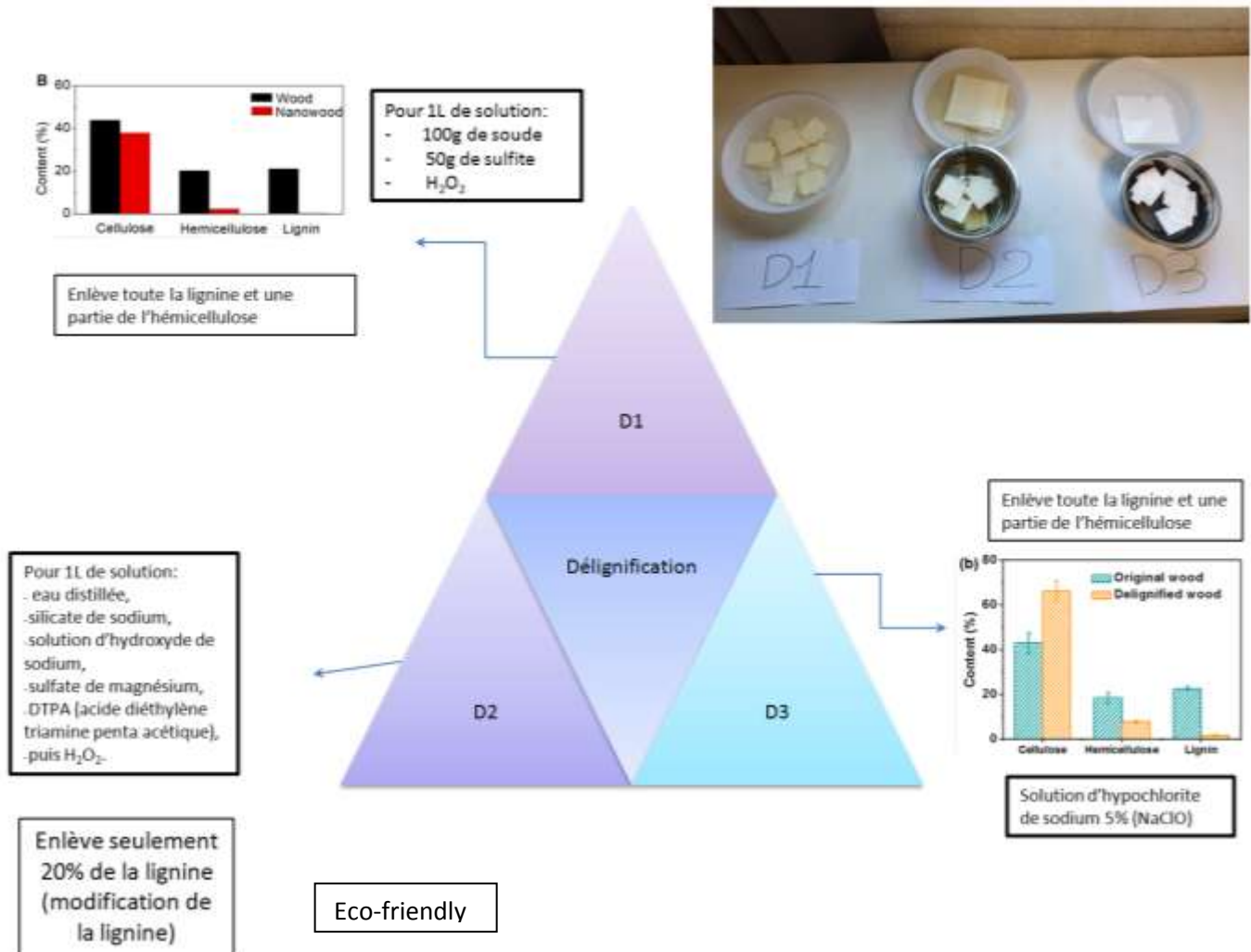


Figure 2.4. Impact du prétraitement sur la matière lignocellulosique.

Le bois sans lignine

Nos recherches dans diverses publications récentes (en anglais !) nous ont conduits à trois protocoles de délignification.



Après beaucoup de recherches, de tests et des commandes de produits chimiques, nous nous lançons dans la fabrication de différents bois modifiés :

- Le bois blanc de notre article de départ Delignified Wood White (DWW) et ce même bois compressé Delignified Wood Compressed (DWC) par la délignification D1.
- Du bois translucide Delignified Wood Translucent (DWTL) par les délignifications D2 et D3

Bois blanc DWW et bois compressé DWC

D'après notre article (Fig.1) et un deuxième article (*Futura Maison 28/07/2019*) le bois délignifié (DWW) peut « recouvrir une surface et faire ainsi baisser sa température de dix degrés. » et « Utilisé dans les revêtements extérieurs et les toits, ce bois refroidissant pourrait faire chuter la facture de la climatisation jusqu'à 60 %, d'après les calculs des chercheurs ».

Nous trouvons la publication correspondante [1] qui confirme : « The newly developed nanowood exhibits excellent thermal insulation properties ».

Un troisième article (*Leyton France 27 juin 2018*) et la publication correspondante [4] concernent le bois compressé (DWC) :

« Les chercheurs ont modifié la structure poreuse du bois naturel en le faisant bouillir sous pression dans une solution d'hydroxyde de sodium et de sulfite de sodium. Ce traitement permet de réduire considérablement l'espace creux dans la structure du bois en éliminant certains des composés environnants comme la lignine. Le bloc est par la suite pressé à 100 °C pendant une journée. Ce processus permet d'obtenir une planche de bois 5 fois plus fine, mais d'une densité 3 fois plus importante que le bois naturel. La résistance du bois augmente par conséquent de 11,5 fois par rapport à sa résistance initiale ».

Nous décidons donc de fabriquer du DWW et du DWC et de vérifier leurs propriétés physiques.

Fabrication

Nous avons commencé par fabriquer du "bois blanc". Pour cela nous nous sommes procurés du balsa que nous avons découpé en 18 carrés de 5 cm de côté et 3 mm d'épaisseur et bien naïvement fait bouillir dans de l'eau oxygénée (peroxyde d'hydrogène), recette tirée de l'article de Science et Avenir (fig.1). Après 7h45 de "cuisson" dans de l'eau oxygénée à 30 volumes à 95°C, les morceaux de balsa ont bel et bien blanchi. Nous étions très heureux et avons décidé de les laisser sécher sous des gros livres afin qu'ils ne gondolent pas.



Nous compressons et chauffons alors 12 carrés, en attendant de recommencer avec une « recette » plus complète.

Compression à l'aide d'un étau et chauffage à 100 °C pendant 10 heures.

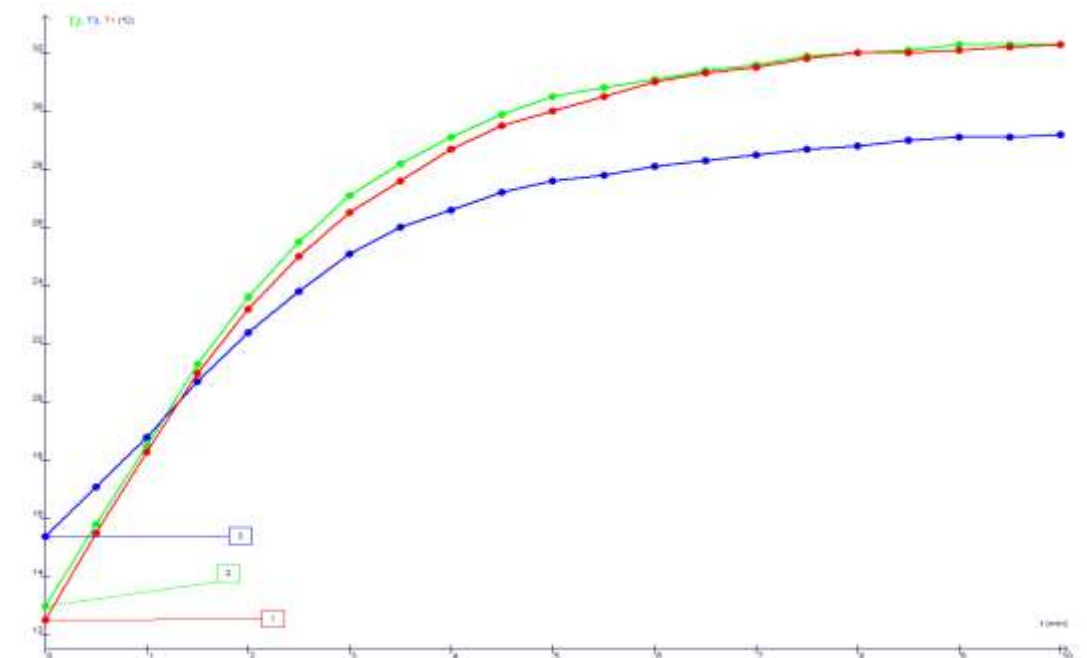
Étude

Nous simulons des petites maisons en fabriquant trois cubes pour vérifier les propriétés thermiques de ce bois amélioré :

- (1) balsa non délignifié et non compressé (Natural Wood NW)
- (2) délignifié mais non compressé (DWW)
- (3) délignifié et compressé (DWC)



Nous les plaçons au congélateur pendant 3h puis les sortons et les disposons sous des lampes à égale distance. Nous déclenchons alors un chronomètre et mesurons leur température intérieure.



Tout d'abord, les températures initiales nous surprennent par leurs valeurs élevées car les boîtes sont restées plus de trois heures au congélateur à -18°C . Ceci montre que le bois qu'il soit traité ou non est un bon isolant thermique.

Ensuite, la température initiale du DWC est supérieure à celle des deux autres : ceci semble être une première indication de sa meilleure résistance thermique. Enfin, la comparaison de l'évolution des températures le confirme : au bout de 10 minutes l'écart de température entre le bois compressé et les autres est de $3,1^{\circ}\text{C}$.

Nous attendions un écart entre le NW et le DWW car nous pensions qu'il y aurait de l'air dans les canaux libérés par la destruction de la lignine, et l'air est un excellent isolant thermique. Or, à notre grande déception, les 2 courbes sont quasi identiques : il doit rester de l'eau oxygénée dans les canaux. Nous étudierons plus en profondeur ce problème par la suite.

Mais Pauline objecte que les boîtes étaient mal fabriquées et que nos résultats pourraient être faussés par l'air fuyant par les interstices. Nous décidons donc de réitérer l'expérience. Mais nous manquons d'échantillons...

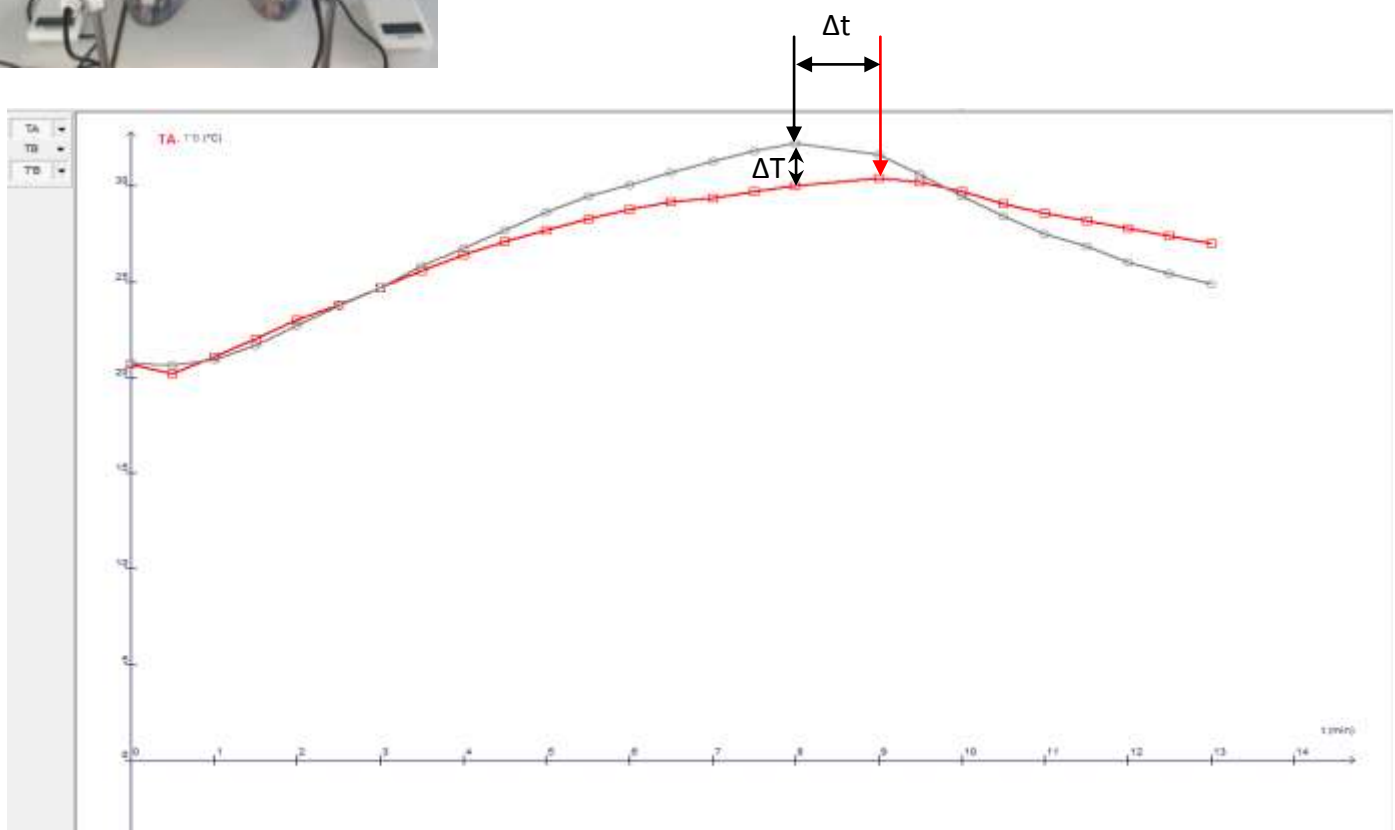
Nous fabriquons alors deux boîtes en peuplier et remplaçons une seule face par du DWC.

Nous réalisons ensuite l'expérience suivante :



- $t=0$: allumage des deux lampes

- $t=8$ minutes : extinction



Ces résultats sont doublement intéressants.

D'une part, nous retrouvons l'écart de température ΔT qui confirme bien la « Cooling Wooditude » du DWC !!! Cette propriété est manifestement due à l'augmentation de la résistance thermique ; nous la mesurerons plus tard.

D'autre part, le décalage Δt entre les maxima présente un énorme intérêt pour le confort thermique d'une maison. Voici les informations trouvées dans un document fourni par un constructeur de maisons en bois (Ganeeva France) :

« Déphasage ou temps de transfert »

C'est une donnée **fondamentale d'un habitat confortable**.

On appelle déphasage, le temps que met le chaud ou le froid pour passer au travers d'une paroi. Il est fonction de la capacité thermique des matériaux qui composent la paroi. Une toiture isolée avec un isolant léger standard aura un déphasage de 3 heures, c'est-à-dire qu'en été le local va surchauffer rapidement par les apports solaires. Les parois performantes ont un déphasage de plus de 12 heures, les locaux restent à une température confortable toute la journée.

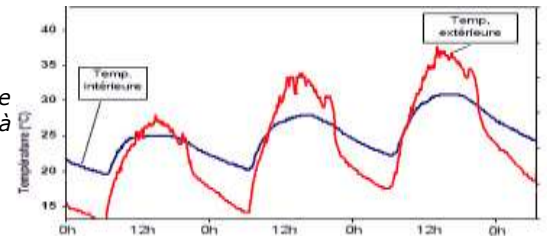
Les isolants ont une faible capacité thermique en comparaison du bois massif

Le déphasage mesure le temps que met la chaleur ou le froid à traverser une paroi.

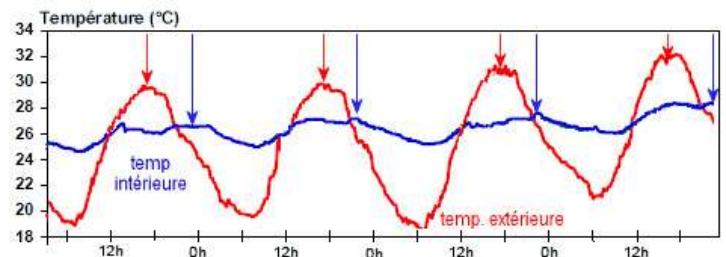
L'avantage du bois comparé à d'autres matériaux isolants est sa capacité thermique d'où découle un temps de transfert de chaleur beaucoup plus important. Ainsi quand la température varie dans de grandes proportions le temps de transfert de la chaleur aux travers des murs est très important (effet de gros murs de pierre).

Maison traditionnelle :

Dans le cas d'une maison dont les murs sont à faible inertie (maison traditionnelle ou ossature bois), la variation de température extérieure sont ressentie très vite à l'intérieur, d'où un confort très nettement diminué.



Ci dessous, une maison GANEEVA dont les murs sont en bois massif (y compris les cloisons), cette variation extérieure de température se fait très faiblement ressentir à l'intérieur. De plus, la reproduction d'une élévation ou diminution de la température extérieure est retardé (flèche rouge et bleu).



Nous observons bien ce déphasage, qui semble donc du à la capacité thermique massique du DWC.

Nous essaierons de la mesurer ultérieurement.

Bois blanc

Le bois blanc n'ayant pas répondu à nos attentes, nous décidons d'utiliser la délignification D1 en soignant la fabrication des boîtes.

Nous préparons des échantillons de balsa et de peuplier de différentes épaisseurs, les pesons et les délignifions.



Mélange soude et sulfite



Eau oxygénée



Nous obtenons un beau bois blanc !

Il faut ensuite soigneusement laver le bois ce que nous n'avons pas fait lors des premiers tests.



Pour ce faire, nous immergeons des échantillons dans un bain d'éthanol que nous plaçons sous la cloche à vide. Dès que la pression diminue des bulles apparaissent. Nous renouvelons l'opération avec de l'acétone. Nous réitérons deux fois l'ensemble.

Ces opérations permettent de nettoyer les canaux :

- L'éthanol enlève l'eau car les deux sont miscibles en toutes proportions.
- L'acétone dissout les espèces organiques (lignine, hémicellulose, cellulose) qui pourraient rester.

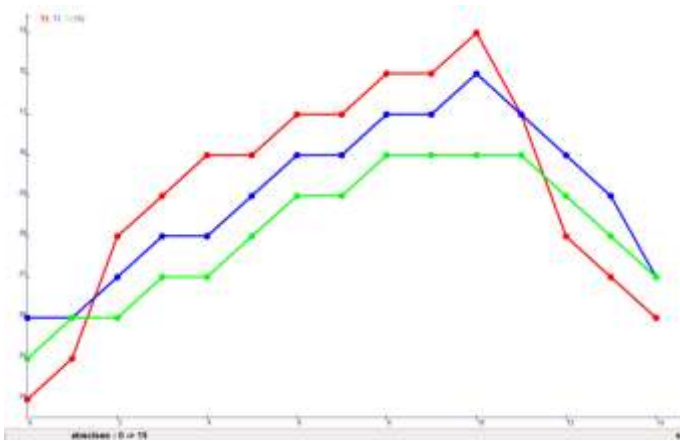
- Au dessous de 0,8 bar, l'éthanol et l'acétone s'évaporent.

Nous découvrirons plus tard un autre procédé plus simple permettant d'éliminer l'eau : la lyophilisation.

Nous revenons alors à notre objectif principal : le bois blanc Cooling Wood (DWW).

Dans la première expérience nous utilisons des lampes à incandescence de 40 W et dans la deuxième des lampes halogène de 20 W.



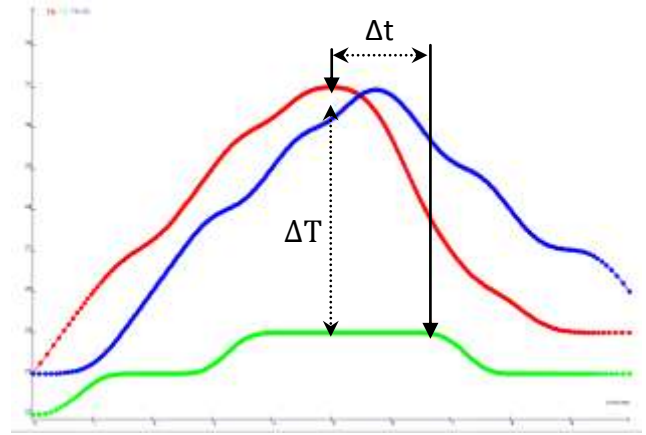


Graphique 1

Rouge : NW

Vert : DWW

Bleu : DWC



Graphique 2

Le but de l'expérimentation est de simuler pendant 24h l'évolution de la température intérieure d'une maison.

De 0 à 5 minutes les lampes sont allumées (jour) et de 5 à 10 les lampes sont éteintes (nuit).

Les différences entre les deux graphiques pourraient s'expliquer par la différence entre les lumières (à étudier...).

Le graphique 2 nous réjouit ! En effet l'écart de température ΔT est de 6°C, proche des 10°C annoncés dans le magazine. Le bois blanc semble bien mériter son nom de **Cooling Wood** !!!

De plus, le déphasage Δt est notable, ce qui est une donnée fondamentale pour un habitat confortable.

Propriétés physiques

Densité

En mesurant l'épaisseur et la surface des échantillons nous en calculons la masse volumique.

D'où les densités : NW 0,14 ; DWW 0,16 ; DWC 0,40.

La densité du DWW est proche de celle du NW en effet il a perdu de la lignine mais aussi du volume lors de la délignification. Celle du DWC est à peu près 3 fois plus grande que celle du NW conformément à ce que nous avons lu.

Résistance mécanique

La résistance mécanique du DWC est très grande [4]

Etude en cours...

Mesures de conductivité thermique

Nous comptons utiliser les boîtes des expériences précédentes en y mettant à l'intérieur une résistance délivrant une puissance constante égale au flux traversant les parois. En mesurant les températures intérieures et extérieures on peut en déduire la conductivité thermique des différents bois.

La conductivité thermique λ est donnée par $\lambda = \frac{U \times I \times e}{(T_1 - T_2) \times S}$ avec : U tension ; I intensité ; e épaisseur du matériau ; T_1 température intérieure de la boîte ; T_2 température extérieure ; S surface totale.

Boîte balsa : $e = 3\text{mm}$; $S = 6 \times 4\text{cm} \times 4\text{cm} = 96\text{ cm}^2$; $U = \dots\text{ V}$; $I = \dots\text{ A}$; $T_1 = \dots^\circ\text{C}$; $T_2 = \dots^\circ\text{C}$; $\lambda = \dots\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

Boîte DWW : $e = 3\text{mm}$; $S = 6 \times 4\text{cm} \times 4\text{cm} = 96\text{ cm}^2$; $U = \dots\text{ V}$; $I = \dots\text{ A}$; $T_1 = \dots^\circ\text{C}$; $T_2 = \dots^\circ\text{C}$; $\lambda = \dots\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

Boîte DWC : $e = 3\text{mm}$; $S = 6 \times 4\text{cm} \times 4\text{cm} = 96\text{ cm}^2$; $U = \dots\text{ V}$; $I = \dots\text{ A}$; $T_1 = \dots^\circ\text{C}$; $T_2 = \dots^\circ\text{C}$; $\lambda = \dots\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

... en cours de réalisation.

Mesures de capacité thermique massique

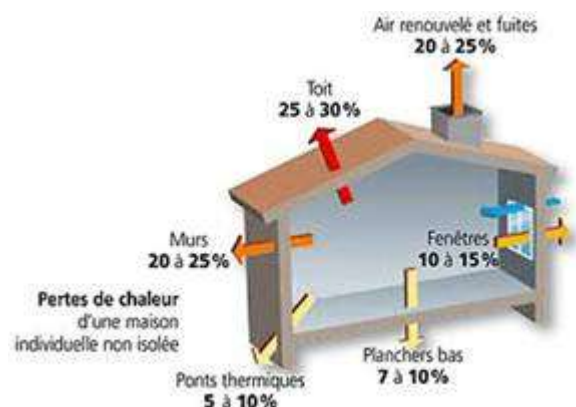
Nous envisageons de plonger un échantillon de bois chauffé à la température T_1 dans de l'eau froide à T_2 , le tout enfermé dans un calorimètre. En mesurant la température d'équilibre T_e , on en déduit la capacité thermique massique de l'échantillon.

... en cours de réalisation.

Nos deux bois modifiés semblent donc bien présenter les propriétés attendues. Mais sont-elles suffisantes pour être utilisées réellement dans la construction ? Afin de répondre à cette question nous rencontrerons par la suite une ingénieure thermicienne du bâtiment. **A suivre...**

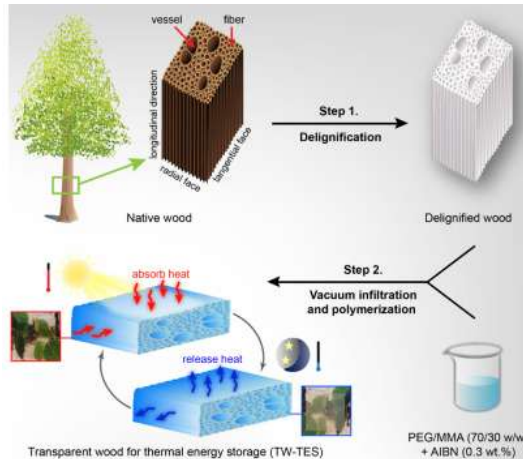
La lecture des publications nous a montré que l'on pouvait aussi fabriquer du bois **transparent** !!!
Exciting isn't it ?

De grandes quantités d'énergie thermique sont perdues par les toits et les fenêtres. Pourrions-nous remplacer les matériaux traditionnels par ce bois afin de minimiser ces pertes ?



Bois transparent

Fabrication



La délignification permet d'obtenir un bois avec des canaux vides.

Pour obtenir un bois transparent il faut ensuite remplir ces canaux avec un polymère transparent.

Quatre polymères sont utilisables à cet effet :

- Le PMMA (Polymétacrylate de méthyle)
- Le PEG (Polyéthylène glycol)
- Le PVA (Polyvinylalcool)
- La résine époxy

Nous abandonnons le PMMA car l'initiateur de polymérisation doit être transporté à froid et la livraison coûte 200 euros.

Nous abandonnons également le PEG car il nécessite des échantillons coupés radialement ce qui réduit la résistance mécanique du bois et le rend inutilisable pour le moment dans la construction. C'est dommage car il a la propriété d'emmagasiner et de restituer la chaleur [6].

Nous fabriquerons donc tout notre bois avec de la résine époxy, l'utilisation du PVA est en cours...



Nous délignifions de nombreux échantillons de balsa par D2 et D3 puis les lavons sous vide à l'éthanol/acétone comme après D1.

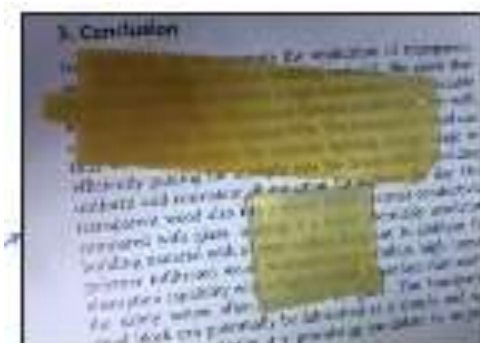
Nous préparons la résine époxy en la mélangeant avec son durcisseur.

Nous y immergeons les échantillons imbibés d'éthanol et les soumettons trois fois à une dépression de 200 Pa.

L'éthanol se vaporise et est remplacé dans les canaux par la résine lors de la remise sous pression.

Nous réalisons de nombreuses expériences avant d'obtenir des bois non pas transparent mais translucide.

C'est une grande satisfaction !



Les bois transparents sont l'objet de nombreuses études depuis quelques années.

Les grandeurs qui les caractérisent sont bien sûr leur conductivité thermique et leur capacité thermique massique, mais aussi leur « transmittance » et leur « haze ».

Par manque de temps nous ne mesurerons pas les deux premières comme nous l'avons fait pour les deux bois précédents.

La mesure du « haze » est trop difficile à notre niveau.

Mesures de transmittance

Nous utilisons un luxmètre et une lampe. Nous interceptons le faisceau lumineux avec nos échantillons

A suivre...

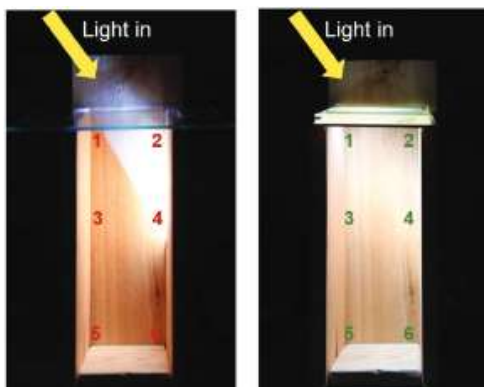
Matériaux	Lux
PEG	200
Epoxy	220
Bois G	241
Verre	434

Haze

Il est difficile de trouver une définition exacte du haze.

Ce mot signifie « voile » en anglais. Plus le haze est bas plus le bois est transparent. Le haze le plus bas obtenu à ce jour est de 10 %.

Transmission de la lumière

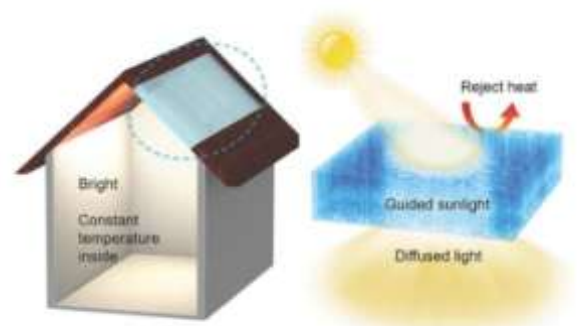


Les rayons lumineux traversent directement le verre sans être déviés.

Lorsqu'ils arrivent sur du bois transparent ils sont guidés par les fibres et la lumière est alors diffusée.

Ce matériau aurait donc un intérêt dans le domaine de l'habitat : il permettrait un éclairage mieux réparti, évitant les zones d'ombre.

De plus sa conductivité thermique, inférieure à celle du verre, permettrait de maintenir une température constante à l'intérieur, économisant ainsi de l'énergie, été comme hiver.



Applications

Nos trois bois modifiés semblent donc très intéressants pour l'habitat.

Cependant, ils ne sont pas encore réellement utilisables.

Il reste de nombreuses difficultés à résoudre (inflammabilité, vieillissement des polymères, imperméabilité...) et notamment pour le bois blanc. Selon le magazine « Futura Maison » :

« Un effet refroidissant plutôt embêtant en hiver

Restent quelques écueils à l'utilisation massive de ce bois blanc. Premièrement, il n'est pas certain que son coût de fabrication plus élevé compense les économies d'électricité réalisées. Deuxièmement, le bois n'est pas couramment utilisé dans les toitures, car il n'est pas aussi durable et imperméable que les tuiles ou les bardeaux bitumés. Mais surtout, l'effet refroidissant devient un handicap l'hiver lorsqu'il s'agit de chauffer la maison. Cela veut dire que ce bois nouvelle version serait réservé aux pays bénéficiant d'un climat chaud toute l'année. »

Enfin, à notre connaissance, aucune étude des propriétés d'isolation acoustique n'a encore été faite.

Nous avons rendez-vous au LMA (laboratoire de mécanique et d'acoustique) avec un chercheur du CNRS en espérant apporter notre pierre à l'édifice !

Conclusion

En partant d'un petit article dans un magazine, nous avons découvert un domaine de recherche récent, encore peu connu et passionnant. Nous sommes très heureux de pouvoir le partager en présentant notre projet.

Nous avons progressé dans de nombreux domaines de la physique et la chimie, travaillé en équipe, échangé avec d'autres lycéens, des professeurs, des personnels de laboratoire, une ingénieure et nous espérons bientôt des chercheurs.

Les bois modifiés présentent des qualités exceptionnelles : résistance mécanique, isolation thermique, transmission de la lumière, redistribution de la chaleur emmagasinée... Ils ont aussi une faible empreinte carbone, ce qui est évidemment primordial pour la survie de notre planète.

Nous avons réussi à fabriquer ces bois à en mesurer quelques propriétés physiques.

Nous n'avons évidemment pas fini d'en explorer les propriétés et les applications, mais nous allons continuer nos recherches car comme l'a si bien dit Timothée Boitouzet, fondateur de la startup Woodoo :

« Si le 19ème siècle était l'âge du fer, le 20ème siècle celui du béton, j'ai la conviction que le 21ème siècle sera l'âge du bois dans la construction ! »

Bibliographie

[1] Anisotropic, lightweight, strong, and super thermally insulating nanowood with naturally aligned nanocellulose

Tian Li^{1,*}, Jianwei Song^{1,*}, Xinpeng Zhao^{2,*}, Zhi Yang^{3,*}, Glenn Pastel¹, Shaomao Xu¹, Chao Jia¹, Jiaqi Dai¹, Chaoji Chen¹, Amy Gong¹, Feng Jiang¹, Yonggang Yao¹, Tianzhu Fan², Bao Yang³, Lars Wågberg^{4,5}, Ronggui Yang^{2,†} and Liangbing Hu¹

[2] Lignin-Retaining Transparent Wood

Dr. Yuanyuan Li, Qiliang Fu, Dr. Ramiro Rojas, Dr. Min Yan, Prof. Martin Lawoko, Prof. Lars Berglund

[3] Clear Wood toward High-Performance Building Materials

Chao Jia, Chaoji Chen, Ruiyu Mi, Tian Li, Jiaqi Dai, Zhi Yang, Yong Pei, Shuaiming He, Huiyang Bian, Soo-Hwan Jang, J. Y. Zhu, Bao Yang, Liangbing Hu

[4] Processing bulk natural wood into a high-performance structural material

Jianwei Song, Chaoji Chen, Shuze Zhu, Mingwei Zhu, Jiaqi Dai, Upamanyu Ray, Yiju Li, Yudi Kuang, Yongfeng Li¹, Nelson Quispe², Yonggang Yao¹, Amy Gong, Ulrich H. Leiste, Hugh A. Bruck, J. Y. Zhu, Azhar Vellore⁵, Heng Li⁶, Marilyn L. Minus⁶, Zheng Jia², Ashlie Martini⁵, Teng Li² & Liangbing Hu¹

[5] Informations Thermiques et Calculs

<http://www.ganeeva.fr/thermique.htm>

[6] Transparent Wood for Thermal Energy Storage and Reversible Optical Transmittance

Céline Montanari,[†] Yuanyuan Li,[†] Hui Chen,[†] Max Yan,[‡] and Lars A. Berglund^{*,†}

Remerciements

Tous nos remerciements à :

Jean-Pierre Roubin, ex-professeur en prépa au lycée Vauvenargues et rapporteur de notre projet aux épreuves régionales.

Cécile Tschudy, professeure en prépa PC au lycée Cézanne.

Grégory et Carole, préparateurs au lycée Vauvenargues, ainsi que toute l'équipe pour leur aide et leur bienveillance.

Pauline Mathieu, ingénieure thermicienne.

Images

Fig.1 Sciences et Avenir juillet/août 2019 n°869/870

Fig.2 https://www.researchgate.net/figure/Spatial-arrangement-of-cellulose-hemicellulose-and-lignin-in-cell-wall-23_fig2_315339733

Fig.3 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LigninStructure.png>

Fig.4 <http://projet-biocarma2.blogspot.com/>