



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: [.http://hdl.handle.net/10985/23011](http://hdl.handle.net/10985/23011)

To cite this version :

Caroline MARC, Bertrand MARCON, Louis DENAUD, Stéphane GIRARDON, Jean-Claude BUTAUD - Évaluations préliminaires des performances de la densitométrie non ionisante du bois par ondes TeraHertz : Projet BOOST - 2022

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Évaluations préliminaires des performances de la densitométrie non ionisante du bois par ondes TeraHertz : Projet BOOST

MARC Caroline¹, MARCON Bertrand¹, DENAUD Louis¹, GIRARDON Stéphane¹, BUTAUD Jean-Claude¹

¹Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, UBFC, HESAM, F-71250 Cluny, France

Caroline.Marc@ensam.eu

Mots clefs : bois ; cartographie ; ondes térahertz ; densité locale ; placage

Contexte et objectifs de la thèse

Présentation de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le projet ANR BOOST ("Le BOis pOur les STructures de véhicules") porté par deux laboratoires : l'Institut Clément Ader (Toulouse et Tarbes) et le LaboMaP (Cluny). L'objectif de ce projet est de démontrer la possibilité de l'utilisation du bois, sous forme de placages, comme matériau structurel pour les véhicules. Le bois, utilisé comme matériau structurel dans l'aviation jusqu'à la Deuxième Guerre mondiale (Castanié et al. 2020) et ponctuellement dans l'automobile, a été sélectionné pour cette étude pour ses propriétés mécaniques et son faible impact écologique lorsque transformé localement ainsi que son impact social positif notamment par la création d'emploi local y compris en ruralité. Toutefois, le bois possède une variabilité intrinsèque due à son origine naturelle (croissance dépendant de son environnement). Or l'industrie du transport est très automatisée, et a besoin de produits standardisés aux performances fiables et répétables. C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser finement les propriétés du bois afin d'estimer au mieux son comportement. L'objectif est de mettre au point un système de mesure des propriétés locales des placages : masse volumique, fissurations induites lors du procédé de déroulage et orientation des fibres. Ne sera présenté par la suite uniquement l'aspect mesure de la masse volumique.

Mesure de la masse volumique

Le bois est un matériau hétérogène. Ces variations de masse volumique sont présentes à différent niveau : cernes de croissances annuels, au sein de la hauteur de l'arbre (diminution suivant la hauteur (Kord et al. 2010), et au sein d'une même essence. Ces variations de masse volumique sont corrélées avec ses propriétés mécaniques (Guitard 1987). D'autres propriétés sont également corrélées à la masse volumique comme les variations dimensionnelles au séchage ou encore la conduction thermique.

Dans le cadre de cette thèse, la spectroscopie par rayonnement aux fréquences térahertz sera utilisée pour mesurer la masse volumique localement et sans contact permettant d'obtenir des cartographies de cette dernière sur l'ensemble des placages. Le domaine térahertz (THz) correspond aux ondes électromagnétiques dont la fréquence est comprise entre 0,1 et 10 THz, et il est adapté à la mesure du matériau bois pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le bois est semi-transparent à ses rayons contrairement aux ondes du domaine des ultra-violets, du visible et des infrarouges. Ensuite, l'énergie des photons associés à cette gamme de fréquences est assez faible, c'est pourquoi les rayonnements THz sont non-ionisants, donc très peu -si ce n'est pas du tout- nocifs pour la santé (Vander Vorst 2006) (contrairement aux rayons X pour la même application). Enfin, cette longueur d'onde permet d'avoir une résolution spatiale de l'ordre du millimètre, suffisant pour mesurer les variations de masse volumique. Il a cependant

fallu attendre les années 80 pour que ces ondes deviennent communément étudiées puis exploitées, faute de sources et de détecteurs suffisamment performants. Aujourd'hui, l'émergence de nouvelles techniques et technologies fait des térahertz un domaine d'étude en plein essor (avec plus de 26 000 articles en 2021 contre 10 400 en 2011), et un des objectifs de cette thèse est de valider ou non sa capacité à mesurer la masse volumique.

Matériel et méthode

Echantillons mesurés

Afin d'estimer la viabilité des mesures térahertz de la masse volumique, 6 échantillons ont été étudiés : 3 en Douglas, un résineux présentant de forts contrastes de densité entre le bois initial et le bois final, et 3 en hêtre, un feuillu considéré comme homogène de ce point de vue. Ces échantillons ont été débités en coupe radiale (coupe LR), ce qui permet d'observer les variations de masse volumique entre le bois d'été et le bois de printemps. Leurs dimensions sont de 50 mm (L) × 50 mm (T), et de 3 épaisseurs différentes (R) : 1 mm, 3 mm et 5 mm. Chaque échantillon a ainsi une différente combinaison d'essence et épaisseur afin de pouvoir étudier l'influence de chaque caractéristique sur les mesures. Un échantillon en peuplier contenant deux nœuds a également pu être caractérisé, pour observer leur impact sur la mesure par térahertz. Cet échantillon mesure 50 mm (L) × 50 mm (R) × 6 mm (T), est issu d'une coupe radiale. Les échantillons ont été portés à l'équilibre et présentent un taux d'humidité moyen de 10,5% ($\pm 1\%$).

Matériel utilisé

Pour ces essais un radar FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) prêté par la société Lytid a été utilisé. Le signal émis par le radar est modulé en fréquence selon une loi en dents de scie comprises entre 130 et 162 GHz, avec une durée de balayage de 65 μ s. A chaque interface rencontrée, c'est-à-dire à chaque changement d'indices de réfraction (exemple : air-bois), le signal est partiellement réfléchi et transmis. La partie réfléchie est détectée par le radar, tandis que la partie transmise continue son chemin jusqu'à rencontrer un autre changement d'indice, et ainsi de suite. Au final, pour chaque point de mesure, le radar permet d'obtenir un signal complexe décomposable en amplitude et phase en fonction de la profondeur dans l'échantillon. Le fonctionnement du radar ainsi que l'explication complète du signal obtenu sont détaillés par Jankiraman (2018). Des cartographies de résolution 1 mm × 1 mm de l'amplitude du signal réfléchi sont donc obtenues à différentes profondeurs dans l'épaisseur de l'échantillon.

Résultats et discussion

Les cartographies d'amplitude de chaque échantillon à une profondeur égale à zéro, soit à la première interface rencontrée par le signal, sont présentées sur la Fig. 1, ainsi que l'image correspondante prise par une caméra (spectre visible). Pour les quatre échantillons les plus fins en épaisseur (a, b, c et d), le quart de la surface de l'échantillon avec des valeurs différentes du reste de la cartographie correspond à un réflecteur métallique qui a été placé à l'arrière des échantillons afin de réfléchir la totalité des ondes l'ayant traversé.

Les différentes parties des cernes du bois se détachent dans les figures précédentes pour les échantillons les plus hétérogènes (Douglas), avec un écart de ~ 5 dB d'amplitude. Il y a aussi de fortes variations autour des nœuds pour l'échantillon en peuplier, tandis que pour les échantillons en hêtre les valeurs sont globalement plus homogènes.

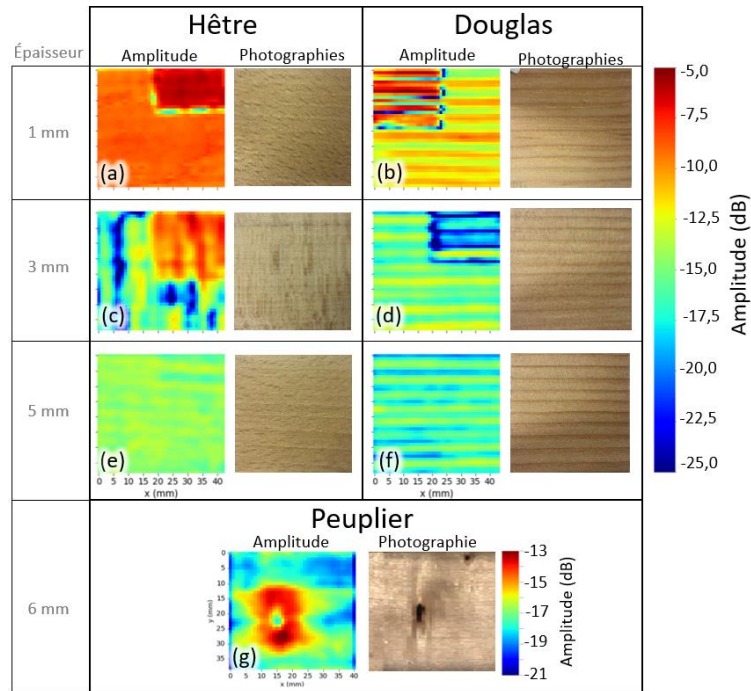


Fig. 1: Amplitude térahertz en décibels et image (spectre visible) de la première interface des échantillons

Dans l'optique de pouvoir comparer les mesures effectuées par onde térahertz à des valeurs de masse volumique des échantillons, ces derniers ont été cartographiés par un scanner rayons X (CombiScan). La figure 2 illustre cette comparaison, en affichant pour chaque point l'amplitude au niveau de la première interface en fonction de la masse volumique mesurée par rayons X. Les valeurs d'amplitude utilisées ont été prises dans les zones sans réflecteur métallique.

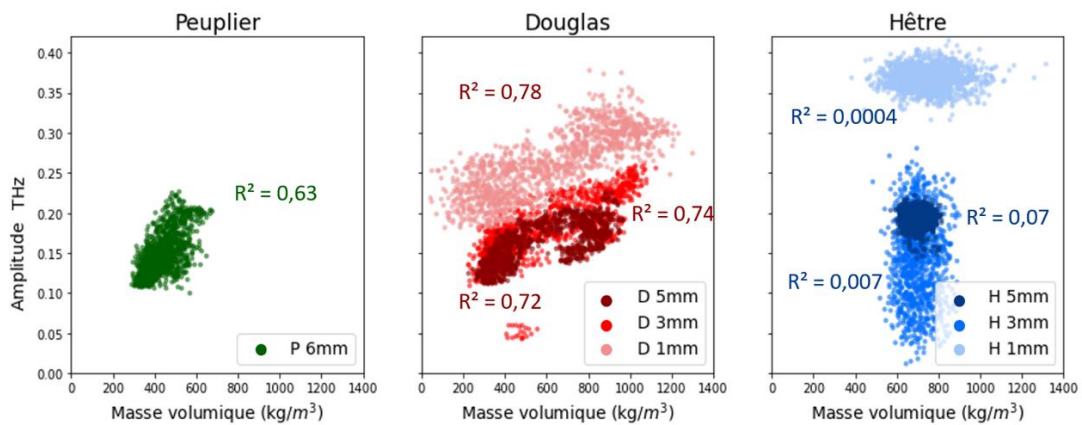


Fig. 2 : Amplitude THz à la première interface de l'échantillon en fonction de la masse volumique mesurée par rayon X, par essence et par épaisseur

Les nuages de points ont une dispersion élevée, mais une corrélation entre les deux types de mesure (THz et RX) pour les échantillons en peuplier et douglas est significative. En effet, les coefficients de détermination (R^2) calculés pour chaque échantillon entre l'amplitude térahertz expérimentale et sa valeur prédite par la régression linéaire entre les deux cartographies sont d'en moyenne 75% ($\pm 3\%$) pour les Douglas, 63% pour le peuplier et seulement 3% ($\pm 3\%$) pour les hêtres et les p-valeurs correspondantes sont égales à 1×10^{-213} , 1×10^{-213} et 0,6 respectivement. Ces valeurs permettent de rejeter l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de relation entre la masse volumique et l'amplitude THz sauf pour les échantillons en hêtre.

Il existe donc une corrélation, mais elle n'est absolument pas précise suivant l'essence de bois. Cela peut s'expliquer éventuellement par un recalage spatial potentiellement trop approximatif. Ce recalage, c'est-à-dire cette mise en correspondance des deux types d'image, a été fait manuellement, et les effets de bords rendaient délicate la tâche de déterminer les contours exacts de chaque échantillon. Cela peut aussi s'expliquer par le fait que les rayons X font une moyenne de la masse volumique sur toute l'épaisseur, or les échantillons n'étant pas toujours parfaitement radiaux (cernes inclinés, variation de la masse volumique dans l'épaisseur) et la masse volumique n'étant pas forcément la même sur toute la hauteur d'un cerne, cette masse volumique moyenne n'est pas forcément égale à celle au niveau de la première face de l'échantillon (face étudiée pour la comparaison).

Conclusion et perspectives

L'information de masse volumique n'a pas encore pu être extraite précisément des mesures par radar térahertz en comparant avec une autre méthode de mesure, les rayons X. De nombreux paramètres, comme deux modes de mesure différents (transmission vs réflexion/radar), ou des échantillons non parfaitement radiaux, rendent cette comparaison imprécise. Pour pallier ces difficultés, deux nouvelles campagnes de mesures seront effectuées. La première sera réalisée avec un système de mesure équivalent à celui utilisé précédemment, mais en prenant cette fois des échantillons parfaitement radiaux et en perçant trois trous de repère pour faciliter le recalage RX-THz (visibles sur les deux cartographies). La deuxième sera exécutée avec un système de mesure aux fréquences térahertz fonctionnant en transmission, principe identique au scanner RX, permettant ainsi une comparaison entre deux jeux de données contenant des informations analogues.

Remerciements

Cette thèse de doctorat est financée dans le cadre du projet ANR-21-CE43-0008-02. 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

- Castanié B., Bouvet C., Ginot M. (2020) Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, Composites Part C: Open Access, vol. 1, p. 100004
- Guitard D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites, Cépaduès
- Jankiraman M. (2018) FMCW Radar Design, Artech House, p. 430
- Kord B., Kialashaki A., Kord B. (2010) The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 34.2 p. 121-126.
- Vander Vorst A., Rosen A., Kotsuka Y. (2006) RF/microwave interaction with biological tissues. John Wiley & Sons.