

Rapport de TIPE

Caractérisation d'échantillons de bois par imagerie térahertz

1) Introduction

a) Problématisation

Dans différents domaines tels que la lutherie, la restauration de tableaux, de monuments une analyse rétrospective est nécessaire afin de déterminer l'historique des traitements subis par le bois. De même, avant de lui incorporer une valeur ajoutée, comme le polissage ou l'application d'un vernis, il est nécessaire d'effectuer un contrôle de sa qualité.

Aujourd'hui les techniques employées pour satisfaire ses exigences sont souvent des méthodes destructives comme le carottage et lorsque celles-ci ne sont pas envisageables on emploie des méthodes d'imagerie à haute énergie comme les rayons X ou gamma.

b) Objectif global

Le but de mon étude est d'expérimenter une nouvelle méthode de contrôle non destructif des matériaux diélectriques tels que le bois essentiellement dans une optique de contrôle qualité. Il faudra ainsi vérifier la faisabilité de la méthode vis à vis du contrôle de paramètres caractéristiques des essences de bois.

2) Expérimentations

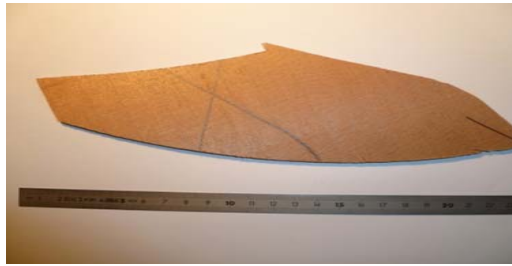
a) Choix des différentes essences

Les d'échantillons étudiés reflètent la diversité des essences rencontrées par les artisans et industriels. Mon choix s'est alors notamment porté sur :

- deux types d'échantillons de bois en sortie d'usine (merisier)



- Un bois de lutherie (cèdre rouge)



- D'autres objets en bois trouvables dans le commerce.

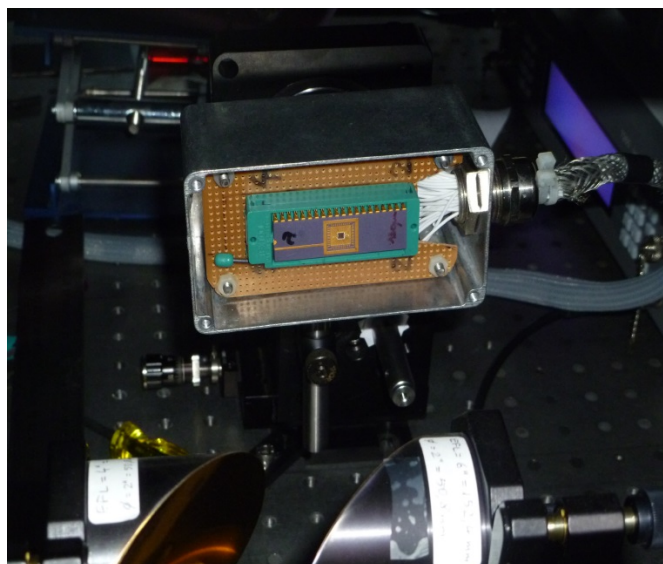
b) Principe expérimental

J'ai été accueilli au sein du laboratoire Charles Coulomb de Montpellier affilié au CNRS afin de réaliser les expériences.

Le domaine TéraHertz étant aussi appelé l'infrarouge lointain, on pourra lui appliquer des méthodes adaptées comparables à celles de l'optique visible ou du proche infrarouge.

L'étude d'un objet nécessite les trois conditions suivantes :

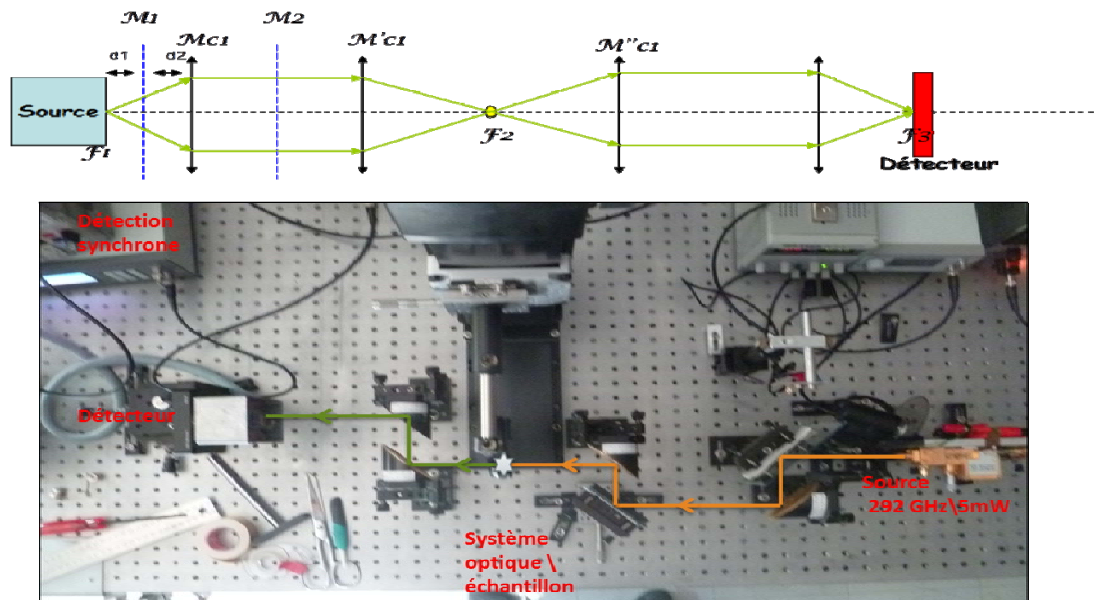
- Une source émettant une onde qui sera porteuse de l'information (*choisie à 292 GHz, 5mW, polarisée horizontalement*)
- Un objet à analyser et un milieu suffisamment transparents
- Un détecteur captant l'onde transmise (*polarisé horizontalement pour une intensité reçue maximale*)



Détecteur CMOS

Le signal reçu par le détecteur est ensuite récupéré par détection synchrone et traité par ordinateur.

Le montage est finalement proche d'un montage d'optique visible usuel mais l'absorption partielle de la radiation TéraHertz à travers des lentilles imposait l'usage d'un système optique à 3 dimensions basé sur des réflexions totales sur des miroirs en or.



Equivalent 2D et montage réel

3) Contrôle de l'influence de différents paramètres sur la transmittance

a) Transparence et influence de l'angle des fibres

Concernant les trois premiers échantillons, j'ai pu montrer expérimentalement le caractère transparent du bois pour ce type d'ondes avec une variation de l'intensité transmise entre 40% et 90%. L'influence de l'orientation des fibres du bois joue donc un rôle important.

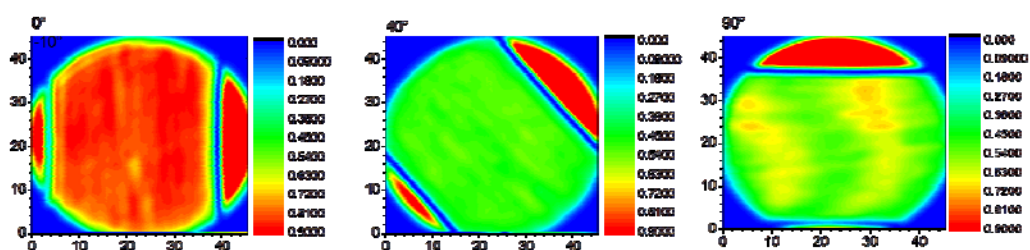
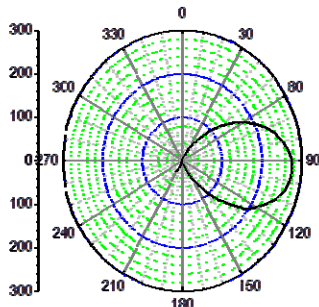
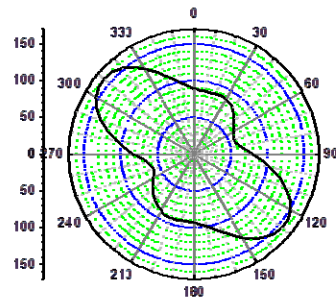


Image THz d'un échantillon de merisier pour trois angles d'orientation des fibres par rapport à la source

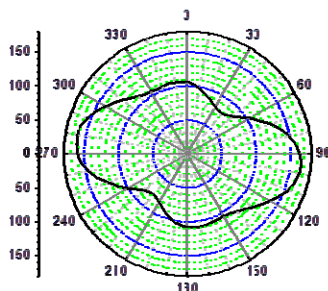
En prenant pour référence un polariseur optique usuel (seules des mesures pour des angles allant de 0° à 180° ont été effectuées pour celui-ci), Une étude graphique a pu être effectuée et le caractère « polarisant » particulier du bois mis en évidence. Il semblerait que l'orientation préférentielle des fibres du matériau tende à entrainer une attitude similaire à celle d'un polariseur optique. Cependant une seconde composante entrainant la création de pics secondaires de transmission module cet effet. Une première interprétation attribue cela aux déformations plus ou moins brutales subies par les fibres lors du travail effectué par l'homme. Ainsi un bois de lutherie travaillé finement, le plus possible selon l'axe des fibres verra l'effet de cette composante considérablement diminué.



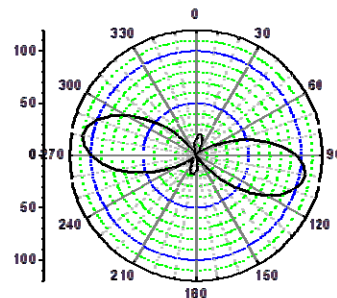
Référence : polariseur optique usuel



Bois usiné, merisier ($\alpha=40^\circ$)



Bois usiné, merisier ($\alpha=0^\circ$)

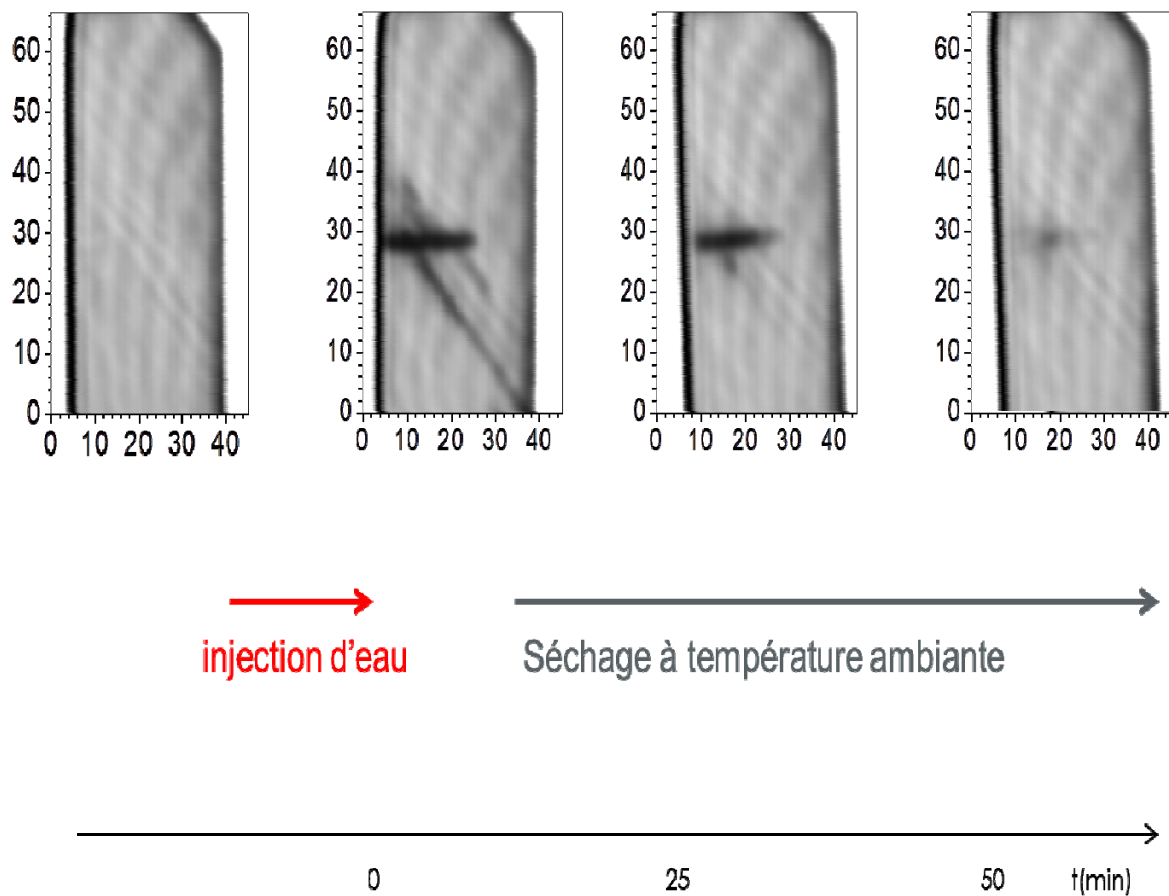


Bois de lutherie, cèdre rouge ($\alpha=10^\circ$)

Courbes polaires de transmittance par rapport au cercle unité effectuées à l'aide du logiciel Origin

b) Analyse qualitative de l'hygrométrie

L'alignement de molécules polaires comme l'eau est un phénomène suffisamment bas en énergie pour que la fréquence de résonance associée se situe dans le domaine TéraHertz. La radiation TéraHertz sera donc fortement absorbée par ce liquide. On teste donc cette hypothèse par une injection d'eau dans un échantillon à l'aide d'une seringue et en réalisant l'observation du processus de séchage.



Le contrôle de l'hygrométrie d'un échantillon serait donc possible à condition de réaliser un

c) Influence de l'épaisseur de l'échantillon

La transmission d'une onde à travers un milieu diélectrique peut entraîner un phénomène d'absorption. Pour un DLHI, le vecteur d'onde et donc l'indice diélectrique du matériau sont a priori complexes de la forme :

$$k^2 = \frac{\omega^2(1 + \chi)}{c^2}$$

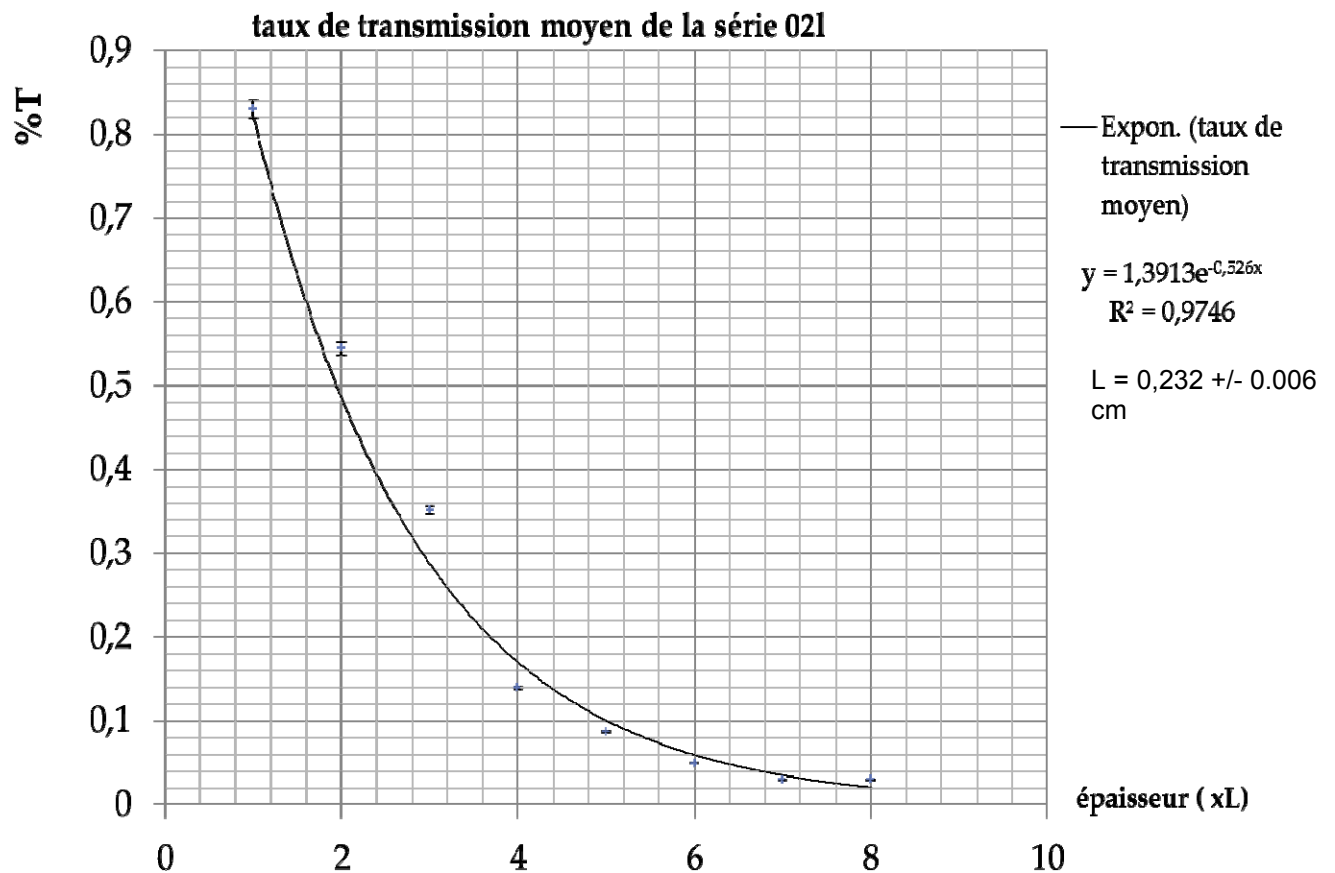
$$n^2 = 1 + \chi$$

On peut donc poser $k = k' + jk''$, et on en déduit l'intensité absorbée par une épaisseur L de

milieu (via le vecteur de Poynting) :

$$I = I_0 \frac{\|k\|}{\|x_0\|} = I_0 e^{-2k''L} = I_0 e^{-2n''k_0L}$$

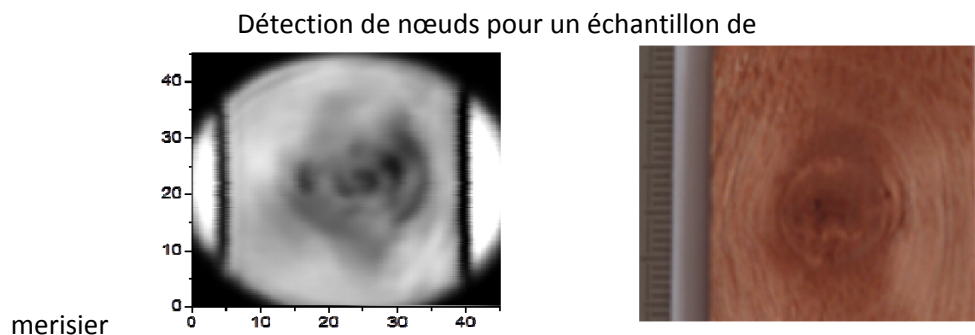
La loi théorique de décroissance exponentielle de l'intensité fournie par le modèle l'électron élastiquement lié doit alors être vérifiée expérimentalement :



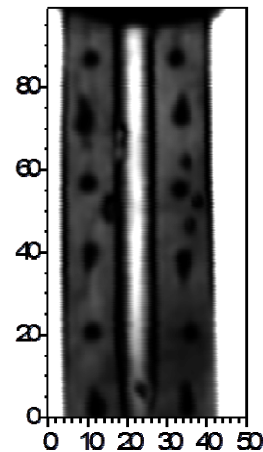
Le coefficient de corrélation est plutôt satisfaisant étant donnée l'inhomogénéité du matériau étudié (merisier)

d) Autres applications

Plus concrètement, cette nouvelle technique d'imagerie pourrait se substituer aux techniques traditionnelles dans le cadre de l'observation du contenu de matériaux diélectriques, dans une atmosphère suffisamment sèche. Les exemples suivants ont aussi été réalisés :

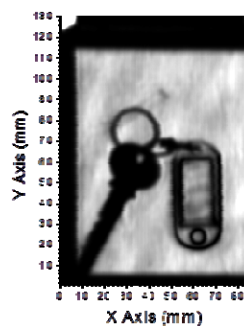
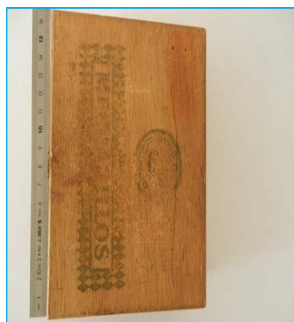


Détection de corps étrangers métalliques dans un support à



encens

Analyse du contenu d'une «boîte mystère »



e) Calculs d'erreur

La mesure d'erreur du détecteur a été effectuée sur 160 points du vide entre la source et le détecteur par rapport à l'intensité maximale enregistrée sur ces mesures. On néglige l'erreur commise par la détection synchrone et due à la manipulation. On obtient alors les résultats suivants :

variance	Intensité moyenne (U.A) (à vide)	écart type	incertitude relative du détecteur
0,00039229	1,44 +/-0,02	0,020	0,014

(D'où les barres d'erreur très faibles sur le graphique précédent)

4) Conclusion

Grâce à cette expérience j'ai pu côtoyer de plus près le milieu de la recherche et de ses exigences d'innovation lorsqu'il s'agit d'un sujet encore peu connu et étudié.

Mes résultats m'ont donc permis de confirmer la faisabilité de cette méthode de caractérisation du matériau diélectrique que j'ai choisi (le bois) et également de d'obtenir des résultats inattendus

notamment sur le comportement « polarisant » du bois pour les ondes térahertz. Des applications industrielles comme en matière de sécurité sont donc envisageables.

Enfin, mes résultats font l'objet de deux publications dont je suis co-auteur : *Investigations of acoustic wood for luthiers using Terahertz imaging*, présentée du 25 au 29 août 2013 à la conférence SPIE (Society of Photographic Instrumentation Engineers) de San Diego, USA, et *Investigations of wood runout using Terahertz imaging*, présentée du 22 au 26 juillet à la conférence EDISON 18 (Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures) de Matsue au Japon .

5) Bibliographie simplifiée

- Coutaz J., *Optoélectronique térahertz*, EDP sciences, 2008
- Schuster F., *Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors*, optics express, 2011
- Federici J., *Review of Moisture and Liquid Detection and Mapping using Terahertz Imaging*, Springer, 2012
- Ayesha Y., *Imagerie Térahertz 2D et 3D : Application pour l'étude des matériaux du patrimoine culturel*, 27-09-2011 (Thèse soutenue le)
- Fukunaga K., *Innovative non-invasive analysis techniques for cultural heritage using terahertz technology*, Comptes rendus Physiques de l'Académie des Sciences, Elsevier Masson SAS, 2010

6) Contacts :

Dominique COQUILLAT, Directrice de recherche au CNRS, au Laboratoire Charles Coulomb, Université Montpellier 2

7) Mots-clés :

Térahertz : Intervalle spectral situé entre 100 GHz et 10 THz dont les longueurs d'onde sont comprises entre 30 μm et 3mm. Les photons associés possèdent des énergies comprises entre 0.42 et 41.5 meV.

Imagerie : Production d'images permettant d'observer un objet en 2 ou 3 dimensions. Ses propriétés comme la profondeur de pénétration ou encore la résolution spatiale diffèrent selon le type d'onde utilisée et selon l'objet observé.

Spectroscopie d'Absorption: Méthode reposant sur la propagation d'une onde à travers un milieu étudié et sur la mesure du rapport de l'énergie transmise par l'énergie incidente.

Diélectrique : Milieu matériel ne comportant pas de porteurs de charge capables de se déplacer librement. Il peut en revanche comporter des dipôles moléculaires temporaires ou permanents potentiellement sensibles au passage d'une onde. Il est caractérisé par sa permittivité et son indice diélectrique.

