

Amélioration de la résolution de cartographie térahertz par méthode de déconvolution

MARC Caroline, MARCON Bertrand, DENAUD Louis, GIRARDON Stéphane,
ROUX Benjamin

Arts et Metiers Institute of Technology, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté, F-71250 Cluny, France

Caroline.Marc@ensam.eu

Mots clés : Téraherz, Imagerie, Densitométrie, Déconvolution, Réseau de neurones

Contexte et objectifs

Les systèmes d'imagerie par ondes térahertz (THz) suscitent un intérêt croissant dans de nombreux domaines, notamment pour l'analyse non destructive de matériaux tels que les bois, et ce grâce à leur bonne pénétrabilité, en tant que matériaux diélectriques, et leur caractère non-ionisant. Des essais préliminaires visant à démontrer la faisabilité de l'utilisation d'ondes THz pour la mesure de la masse volumique du bois, dans le but de remplacer les mesures par rayons X qui sont ionisantes, montrent des résultats très prometteurs (Marc et al 2023). Cependant, l'une des principales limitations de ces systèmes réside dans leur résolution spatiale, qui dépend directement de la longueur d'onde utilisée. En particulier, les systèmes d'émission THz employant des ondes millimétriques cohérentes génèrent un faisceau gaussien, tels que modélisé par Dickson (1970) et illustré à la Fig. 1b, différents d'un faisceau idéalement focalisé comme illustré à la Fig. 1a.

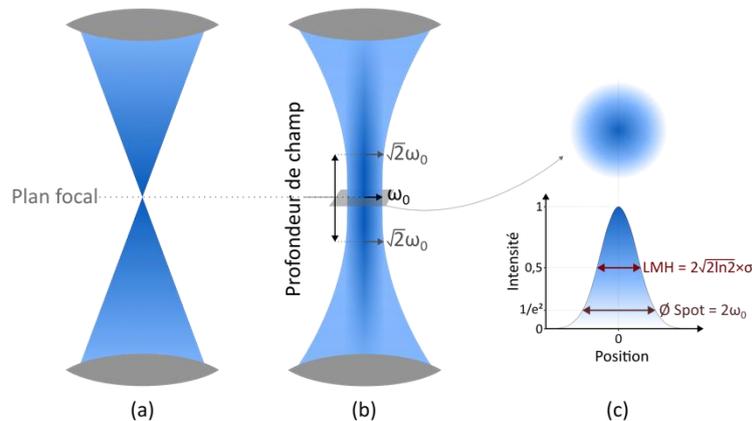


Fig. 1 : (a) Focalisation idéale ; (b) Faisceau gaussien ; (c) Représentation du spot gaussien et de son profil, $LMH =$ Largeur à Mi-Hauteur

Lorsqu'un objet réel I_0 est capturée avec un système d'imagerie ayant une fonction d'étalement de point PSF (Point Spread Function en anglais) en présence d'un bruit additif indépendant n , l'image observée résultante I répond à l'équation suivante :

$$I(x, y) = I_0(x, y) \otimes PSF + n(x, y) \quad (1)$$

La PSF d'un système décrit la réponse d'un système d'imagerie à un objet ou une source ponctuelle. Dans le cas du système d'imagerie THz étudié, la PSF correspond au spot gaussien schématisé sur la Fig. 1c. La convolution de cette PSF avec l'image réelle entraîne un flou dans les cartographies acquises, compliquant l'observation de certains détails, comme les variations de densité au sein des cernes annuels.

La déconvolution est un procédé visant à inverser les effets de la convolution. L'objectif de cette étude est donc de déconvoluer les cartographies THz afin de restaurer de façon optimale les détails et contrastes de ces images. La première étape sera la caractérisation de la *PSF*. Une fois celle-ci connue, plusieurs méthodes de déconvolution seront éprouvées sur des cartographies THz d'échantillons de douglas (*Pseudotsuga menziesii*), en utilisant les cartographies obtenues par imagerie rayons X comme référence.

Matériels et méthodes

Echantillons mesurés

Pour cette étude, 8 échantillons de douglas ont été étudiés. Ces échantillons proviennent d'une coupe radiale, ce qui permet d'observer dans le plan de la mesure l'alternance de densité intracorne entre bois initial et bois final, particulièrement marquée chez le douglas, et donc a priori visible sur les mesures présentées par la suite. Ils mesurent 130 mm (L) × 60 mm (R), avec une épaisseur de 3 mm (T) pour la moitié des échantillons et de 5 mm pour l'autre moitié. Afin de faciliter la comparaison entre les différentes méthodes de mesures, tous les échantillons sont percés ($\emptyset = 6$ mm) dans trois de leurs coins, permettant d'ajuster les différentes cartographies entre elles.

Systèmes de mesure

Les échantillons sont tout d'abord scannés à l'aide d'un scanner optique industriel équipé, entre autres, d'un système d'imagerie par transmission de rayons X. Ce processus a généré des cartographies bidimensionnelles en niveaux de gris de 12 bits (*i.e.* de 0 à 4095). Ces niveaux de gris sont directement proportionnels à l'intensité du rayonnement X transmis et, par conséquent, liés à la masse volumique selon la loi de Beer-Lambert (Kim et al 2006). Ainsi, les cartographies obtenues par imagerie rayons X serviront de référence pour la comparaison avec les mesures par rayonnement THz.

Celles-ci sont effectuées à l'aide d'un système d'imagerie THz en transmission, illustré sur la Fig. 2, composé d'une source (TeraSchottky, Lytid) émettant à 136 GHz, d'un détecteur (TeraPyro, Lytid), d'optiques, et d'un système permettant de déplacer l'échantillon dans le plan focal pour obtenir des cartographies de résolution 1 mm × 1 mm.

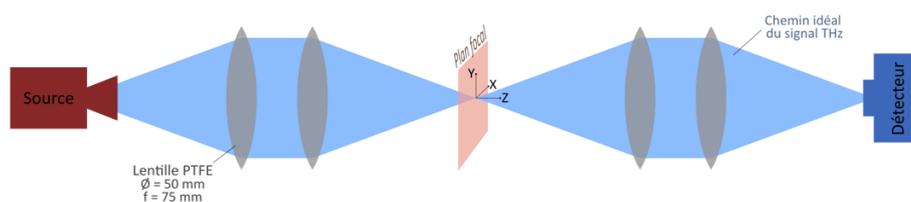


Fig. 2 : Schéma du système de mesure THz

Estimation de la résolution spatiale du système de mesure THz

Pour estimer le profil du faisceau, et plus particulièrement caractériser le spot THz au niveau du plan focal, le test du couteau (Chiu et Pan 2007, Khosrofian et Garetz 1983) a été effectué. Cette méthode, schématisée sur la Fig. 3, consiste en l'obstruction progressive du faisceau à l'aide d'une lame métallique (mince et parfaitement opaque aux ondes THz), afin de pouvoir corréler l'intensité du signal perçu par le détecteur à la position de la lame. A une hauteur z fixe, l'intensité détectée en fonction de la position de l'extrémité de la lame (croix orange sur la Fig. 3) correspond à la primitive du profil d'intensité locale du faisceau. Le profil d'intensité du faisceau permet de calculer l'écart-type σ de la *PSF* et le diamètre du spot, comme exposé à la Fig. 1c. Pour cette étude, le couteau a été déplacé en Z avec un pas de 5 mm entre les deux

lentilles bornant la zone de focalisation, et en X avec un pas de 1 mm sur une longueur égale au diamètre des lentilles. Cette opération a ensuite été répétée mais cette fois en déplaçant le couteau dans le plan (Y, Z), pour vérifier la circularité du faisceau.

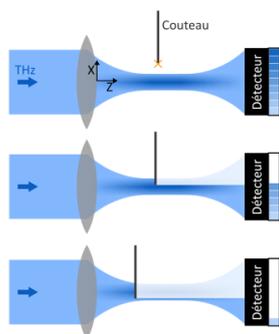


Fig. 3 : Schéma simplifié du fonctionnement du test du couteau

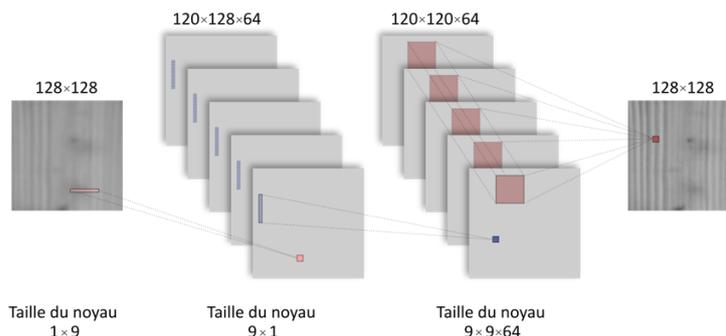


Fig. 4 : Architecture du réseau de neurones pour la déconvolution (inspiré de Xu et al 2014)

Méthodes de déconvolution

Une fois la *PSF* déterminée, différentes approches de déconvolution ont été appliquées pour restaurer les cartographies THz. Trois méthodes ont été comparées : deux méthodes de référence, très couramment utilisées pour les déconvolutions non-aveugle (*i.e.* avec une *PSF* connue), qui sont la méthode de Wiener (1949) et l'algorithme de Richardson-Lucy (RL) (Lucy 1974, Richardson 1972), ainsi qu'une méthode de déconvolution par réseau de neurones convolutifs (CNN).

La méthode de déconvolution par CNN utilisée dans cette étude s'inspire de celle proposée par Xu et al (2014), également utilisée par Ljubenović et al (2020) pour des images THz. L'architecture du réseau, illustrée sur la Fig. 4, est conçue pour imiter certaines caractéristiques des méthodes classiques de déconvolution, notamment la décomposition en valeurs singulières (SVD) (Hendler et Shrager 1994), tout en bénéficiant de l'apprentissage automatique. Les deux premières couches appliquent des convolutions avec des noyaux orientés horizontalement et verticalement pour extraire les variations directionnelles de l'image. La dernière couche réalise une convolution avec un grand noyau carré, permettant une reconstruction globale. Contrairement à la SVD, où les filtres sont statiques, ici ils sont optimisés pendant l'entraînement, ce qui rend la méthode plus flexible et adaptée aux spécificités des images THz.

Pour entraîner et évaluer le réseau, un jeu de données composé de couples d'images « dégradées » (image d'entrée) et de leurs équivalents « nettes » (image de vérité terrain) a été créé. Étant donnée la haute résolution du système de mesure par rayons X, la large base de données de scans RX de planches disponibles au LaBoMaP a été utilisée pour confectionner ce jeu de données. Les cartographies de 1230 planches d'essences diverses (thuya, chêne, hêtre, épicéa, douglas et balsa) ont été normalisées entre 0 et 1 puis débruitées avant d'être découpées en 16 058 images de 128×128 px², constituant ainsi le lot d'images de vérité terrain. Le lot d'images d'entrée est lui obtenu en convoluant ces images avec la *PSF* déterminée à l'étape précédente.

Le jeu de données est divisé en trois parties : données d'entraînement (64%), données de validation (16%) et données de test (20%). Les données d'entraînement servent à ajuster les poids du modèle, les données de validation permettent d'évaluer les performances en cours d'entraînement et de prévenir le surapprentissage. Les données de test estiment les performances finales du modèle sur des données non-traitées par l'algorithme d'apprentissage.

Résultats et discussions

Estimation de la PSF

Les résultats des tests du couteau effectués dans les directions X et Y sont illustrés dans la Fig. 5, et les caractéristiques de la PSF qui en ont été extraites sont exposées dans le Tab. 1. Les profils de la PSF dans les directions X et Y sont sensiblement différents, avec des diamètres de spot qui diffèrent d'environ 0,5 mm. Cet écart est possiblement dû à une réelle asymétrie du faisceau, peut-être causée par les lentilles ou la source elle-même, mais peut être également expliqué par les différentes conditions entre les deux mesures, qui n'ont notamment pas été effectuées le même jour. Pour le reste de cette étude, l'écart entre les deux mesures sera considéré comme négligeable, et le spot comme parfaitement circulaire. L'écart-type utilisé par la suite sera la moyenne des deux écart-types calculés. Par ailleurs, la profondeur de champ (cf Fig. 1) s'est révélée complexe à déterminer précisément à cause de l'irrégularité du diamètre du faisceau observable sur la partie gauche de la Fig. 5, qui semble être due à des cavités de Fabry-Pérot (Colegrave et Abdalla 1981), mais reste nettement supérieure (minimum 15 mm) à l'épaisseur des échantillons étudiés (maximum 5 mm).

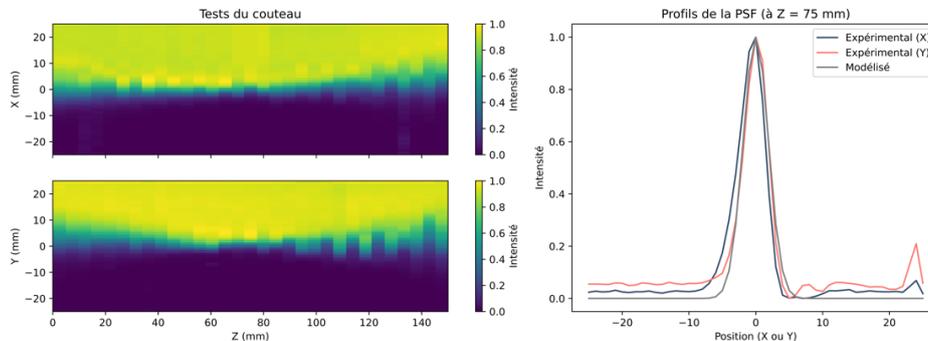


Fig. 5 : Résultats des tests du couteau et profils expérimentaux et théoriques de la PSF

Tab. 1 : Caractéristiques de la PSF mesurée dans les directions X et Y

Axe	σ (mm)	\varnothing Spot (mm)
X	1,96	8,46
Y	1,82	7,92

Résultats de la déconvolution

Les cartographies obtenues par rayons X et par THz, ainsi que les résultats des différentes méthodes de déconvolution, pour un des échantillons de douglas de 5 mm d'épaisseur, sont présentées sur la Fig. 6. La photographie de l'échantillon permet de relever 9 cernes annuels, ce qui est également le cas de la cartographie RX. En revanche, la cartographie originale THz ne permet pas de toutes les discerner, le diamètre du spot THz étant plus large que la largeur de certains cernes. Toutefois, la déconvolution permet d'en restaurer certains, comme cela est visible dans les zooms de la Fig. 6. Une amélioration de la résolution est observable pour les 3 méthodes, et en particulier pour la déconvolution de Wiener, où 9 cernes sont également clairement observables.

D'un point de vue qualitatif, les cartographies THz déconvoluées semblent donc se rapprocher de la référence, obtenue par RX. Concernant le point de vue quantitatif, la Fig. 7 permet d'observer le coefficient de détermination de la régression linéaire entre RX et THz par échantillon. Tout d'abord, il est notable que, avec ou sans déconvolution, les R^2 sont meilleurs pour les échantillons les plus fins. Pour les échantillons de 5 mm d'épaisseur, les valeurs de R^2 pour les THz déconvolués sont relativement similaires aux valeurs des THz convolués, il n'y a

pas d'amélioration remarquable due à la déconvolution. En revanche, pour les échantillons de 3 mm d'épaisseur, à l'exception de la méthode de Richardson-Lucy, la déconvolution améliore grandement la corrélation RX-THz. En effet, sur les 4 échantillons les plus fins, la déconvolution par CNN améliore les R^2 de 14 points en moyenne, et de 25 points pour la déconvolution de Wiener, ce qui double quasiment les valeurs d'origines.

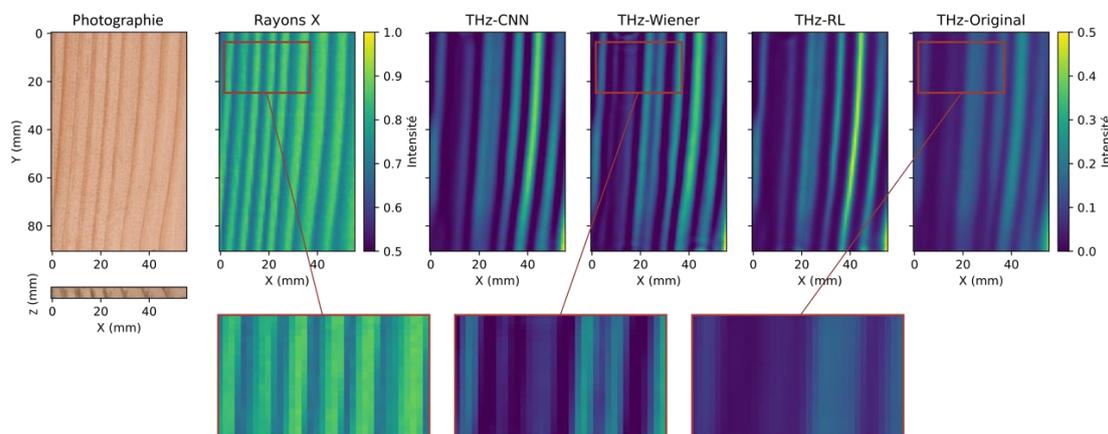


Fig. 6 : Photographie d'un échantillon (n°6) de douglas de 5 mm d'épaisseur et de sa tranche, sa cartographie obtenue par rayons X et par THz, et les résultats de la déconvolution de 3 manières différentes (réseau de neurones, Wiener et Richardson-Lucy)

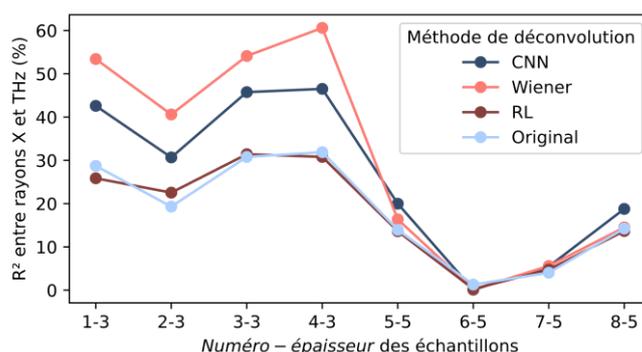


Fig. 7 : Coefficients de détermination entre les cartographies rayons X et THz, pour chaque échantillon, et pour chaque méthode de déconvolution

Les cartographies présentées à la Fig. 6, qui sont pourtant visiblement similaires les unes des autres, sont celles de l'échantillon 6-5, qui possède le R^2 le plus bas, proche de zéro. Cette faible valeur, et celles des autres échantillons de 5 mm, pourrait s'expliquer de par la discontinuité du milieu traversé par l'onde au sein de l'échantillon due à l'inclinaison de cerne par rapport à l'axe Z (débit difficilement parfaitement radial), comme cela est visible sur la photographie de la tranche à la Fig. 6. Les différences d'interaction onde-matière entre les RX et les THz font alors que les 2 types de scans donnent des résultats différents pour un milieu non-uniforme, et à inclinaison de cerne constante, cette non-uniformité est logiquement plus visible chez les échantillons les plus épais.

Conclusions et perspectives

Cette étude a démontré le potentiel des systèmes d'imagerie THz pour évaluer la masse volumique du bois de manière non destructive. Bien que les cartographies obtenues se rapprochent des mesures de référence par rayons X, la résolution spatiale limitée par la *PSF* du faisceau THz engendre une dégradation perceptible. Les méthodes de déconvolution testées (Wiener, Richardson-Lucy, CNN) ont amélioré la qualité des cartographies, en particulier la

déconvolution de Wiener, qui a montré les meilleurs résultats. Cependant, l'efficacité de la déconvolution dépend fortement de la précision de la modélisation de la *PSF*. Les perspectives incluent une meilleure caractérisation du faisceau, ainsi qu'une amélioration du CNN, en optimisant l'architecture du réseau et en enrichissant le jeu de données d'entraînement.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse financée par l'ANR BOOST (ANR-21-CE43-0008-02). Les auteurs remercient également la plate-forme technique Xylomat financée par l'ANR-10-EQPX-16 XYLOFOREST qui largement été utilisée pour réaliser cette étude.

Références

Chiu Y, Pan J-H (2007) Micro knife-edge optical measurement device in a silicon-on-insulator substrate. *Opt. Express* 15, 6367. <https://doi.org/10.1364/OE.15.006367>

Colegrave RK, Abdalla MS (1981) A Canonical Description of the Fabry-Pérot Cavity. *Opt. Acta Int. J. Opt.* 28, 495–501. <https://doi.org/10.1080/713820584>

Dickson LD (1970) Characteristics of a Propagating Gaussian Beam. *Appl. Opt.* 9, 1854. <https://doi.org/10.1364/AO.9.001854>

Hendler RW, Shrager RI (1994) Deconvolutions based on singular value decomposition and the pseudoinverse: a guide for beginners. *J. Biochem. Biophys. Methods* 28, 1–33. [https://doi.org/10.1016/0165-022X\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0165-022X(94)90061-2)

Khosrofian JM, Gartz BA (1983) Measurement of a Gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data. *Appl. Opt.* 22, 3406. <https://doi.org/10.1364/AO.22.003406>

Kim K-M, Lee S-J, Lee J-J (2006) Development of portable X-ray CT system 1-evaluation of wood density using X-ray radiography. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 34, 15–22.

Ljubenović M, Bazrafkan S, De Beenhouwer J, Sijbers J (2020) CNN-based Deblurring of Terahertz Images. In: *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. Presented at the 15th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Valletta, Malta, pp. 323–330. <https://doi.org/10.5220/0008973103230330>

Lucy LB (1974) An iterative technique for the rectification of observed distributions. *Astron. J.* 79, 745. <https://doi.org/10.1086/111605>

Marc C, Marcon B, Denaud L, Girardon S, Butaud J-C (2023) Preliminary performance evaluations of non-ionizing terahertz wood densitometry. In: *20th International Conference on Experimental Mechanics*. Presented at the 20th international conference on experimental mechanics, Porto, Portugal.

Richardson WH (1972) Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. *J. Opt. Soc. Am.* 62, 55. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.000055>

Wiener N (1949) *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series: With engineering applications*. MIT Press 113, 1043–54. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2946.001.0001>

Xu L, Ren JS, Liu C, Jia J (2014) Deep Convolutional Neural Network for Image Deconvolution. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 27, 1790–1798.