

Méthodes de rayonnement terahertz et de sondes thermiques planes en vue de l'examen non-destructif de murs épais pour le diagnostic thermique de bâtiments.

Yingying YANG, Tingting Vogt WU*, Alain SEMPEY, Christophe PRADERE, Alain SOMMIER, Jean-Christophe BATSALE

I2M, département TREFLE, UMR 5295, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence

* (auteur correspondant : tingting.vogt-wu@u-bordeaux.fr)

Résumé - Le diagnostic thermique non-intrusif est un thème crucial en vue de la rénovation de bâtiments anciens, l'examen de structures de génie civil ou l'accréditation de bâtiments neufs. Très peu de méthodes de diagnostic existent pour la caractérisation de murs épais. Il est proposé ici de montrer les premiers résultats et les caractérisations de méthodes combinant rayonnement térahertz et sondes thermiques sur différents exemples de multicouches formés de plâtre, béton et isolant qui sont les composants classiques de parois du bâtiment.

Nomenclature

I_0	intensité du signal d'entrée, W	L	épaisseur de l'échantillon, cm
I_t	intensité du signal de sortie, W	A	absorbance
k	coefficient d'absorption	C	du béton
R	la couche d'isolation	P	la couche de plâtre
Q	la source chaude	T	la température

1. Introduction

Le diagnostic thermique non-intrusif est un thème crucial en vue de la rénovation de bâtiments anciens, l'examen de structures de génie civil ou l'accréditation de bâtiments neufs. Très souvent, l'estimation de paramètres thermiques effectifs (conductivité ou résistance thermique globale de murs épais) est effectuée à partir de calculs a priori en faisant des hypothèses sur les propriétés de chaque couche constitutive du mur. Une des raisons de l'absence de méthodes in situ est due au fait que les temps caractéristiques des méthodes classiques de type sonde planes (avec analyse de réponse de température et de flux) sont relatives à des temps caractéristiques très longs dans le cas de murs épais. Afin de contourner cet inconvénient, il est ici proposé d'associer une méthode de sonde plane en temps court à une méthode utilisant le rayonnement térahertz.

D'un côté, le rayonnement térahertz ^[1] est utilisé pour caractériser l'absorption radiative de matériaux non métalliques et faiblement chargés d'eau. Les propriétés d'absorption seront étudiées pour une large gamme de matériaux standards de bâtiments. Le principal inconvénient est que si ces méthodes sont sensibles à la présence de matériaux denses, les isolants sont en général transparents. Il n'est donc pas possible de distinguer la nature et la position des constituants car une tomographie complète est difficile à réaliser in situ, dans le cas de multicouches.

D'un autre côté, les méthodes de sondes thermiques sont sensibles à la présence d'isolants et beaucoup moins sensibles à la présence de matériaux lourds et conducteurs (effusifs), mais peuvent permettre de distinguer l'ordre des couches dans certains cas. Il est cependant

nécessaire de limiter les temps d'analyse ^[2, 3, 4] par des études à faible épaisseur de pénétration thermique.

Cette étude est préliminaire. Il est proposé de montrer les premiers résultats de caractérisation des matériaux par rayonnement térahertz et les premiers résultats de simulation thermiques sur des exemples de multicouches formés de plâtre, béton et isolant.

2. Caractérisation des matériaux par la mesure de transmission térahertz.

2.1 Principe

La bande de fréquence térahertz désigne les ondes électromagnétiques s'étendant de 0,1 (ou 0,3) à 10 THz (longueur d'onde de 3mm à 3 μ m) ^[5]. Elle est intermédiaire entre les micro-ondes et les infrarouges (Fig.1).

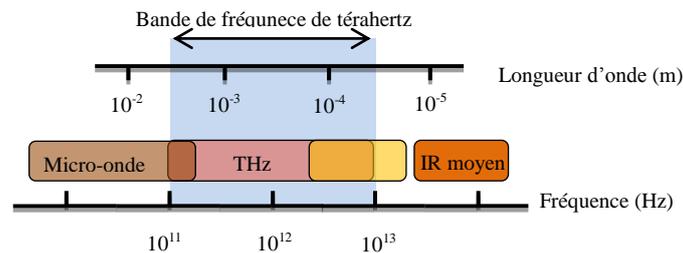


Figure 1: *Bande de fréquence de THz dans le spectre électromagnétique*

De plus en plus d'études ont été réalisées durant les deux dernières décennies à propos des différentes technologies exploitant les térahertz. En effet, cette bande de fréquences dispose de certaines propriétés remarquables et a été utilisée largement dans des domaines tels que les contrôles de sécurité, les contrôles non-destructifs, la climatologie, la biologie, les applications militaires, l'écologie ou la médecine ^[6].

En particulier, les térahertz sont particulièrement adaptés aux contrôles non-destructifs (CND) : ils permettent de développer des méthodes non-invasives, sans contact, non ionisantes qui pourraient remplacer avantageusement les autres méthodes de CND basées sur les rayons-X, les ultrasons ou les thermographies. Les ondes térahertz peuvent en effet traverser les matériaux composites afin de détecter des défauts tels que des bulles d'air, des décollements ou délaminages, des dégâts mécaniques ou thermiques ^[7,8,9]. En outre, elles peuvent être utilisées afin d'analyser la structure de matériaux, par exemple des matériaux isolants telles que les mousses polymères et d'en caractériser certaines propriétés ^[10,11,12,13].

Les avantages du CND THz dans le domaine des diagnostics du bâtiment sont :

1. Les ondes THz pénètrent les matériaux non conducteurs, avec un déphasage très faible.
2. Les ondes THz ne présentent aucun danger pour les opérateurs et les murs.
3. Le coefficient d'absorption varie fortement avec la proportion d'eau dans le milieu. La quantité d'eau, ainsi que les dégradations dues à la pénétration d'eau dans le bois ou le béton, peuvent être détectées à partir de l'atténuation de l'onde. L'eau peut aussi servir à révéler de petites fissures dans le béton grâce à cette propriété.

De plus, les méthodes de CND THz peuvent être couplées à d'autres méthodes de CND pour améliorer leur précision et efficacité ^[14]. Les analyses les plus fiables et précises sont réalisées en combinant différentes méthodes. De nombreux travaux de recherche ont déjà été menés dans le but d'établir le diagnostic d'une enveloppe de bâtiment avec des ondes térahertz ^[12,13,14,15].

L'absorbance du matériau est calculée à partir de l'intensité des signaux émis et captés en sortie et de la loi de Beer-Lambert (1) :

$$A = -\log_{10}\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = kL \quad (1)$$

For multilayer samples, the overall absorption is the sum of absorption of each layer, Eq (2).

Pour des échantillons multicouches, l'absorbance totale est la somme de l'absorbance de chaque couche. Selon l'équation (2), l'ordre des couches de matériaux n'a pas d'influence sur l'absorbance totale.

$$A = A1 + A2 + \dots + An = -\log_{10}\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = k1L1 + k2L2 + \dots + knLn \quad (2)$$

2.2 Montage expérimental

Dans le cadre de notre campagne expérimentale, nous avons utilisé la méthode de l'onde continue THz (continuous wave en anglais) ^[16]. Le dispositif comporte un ordinateur (chargé du contrôle des conditions expérimentales et de l'acquisition des données), d'une source térahertz (signal produit à 0.11THz de 200 mW), d'un support (cadre permettant de maintenir les matériaux), d'un contrôleur (carte de commande électronique et acquisition de données) et d'une alimentation.

Le montage inclut un capteur infrarouge, des lentilles, un obturateur rotatif, une source et l'échantillon (voir la figure 2), qui sont tous alignés. Le capteur infrarouge relève le signal transmis, qui est ensuite traité par l'ordinateur. Les lentilles en téflon sont transparentes pour les térahertz et permettent de focaliser les rayons. Le signal est modulé par l'obturateur qui tourne à la fréquence de 16 Hz. La résolution angulaire est limitée par la diffraction : la résolution minimale est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde incidente. Le faisceau incident est focalisé au niveau de l'échantillon, la zone impactée est donc quasi-ponctuelle sur l'échantillon qui est déplacé afin d'être ausculté sur toute sa surface.

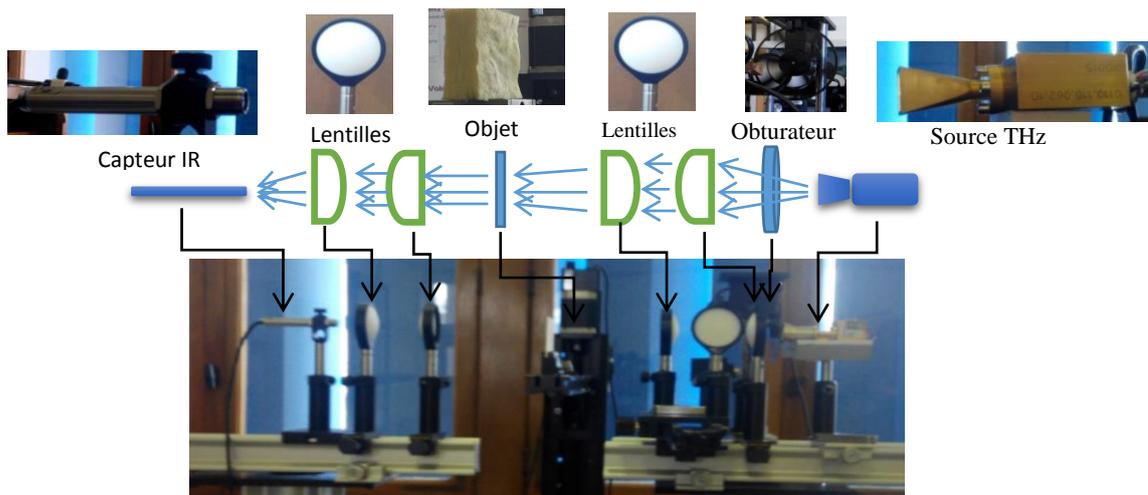


Figure 2: Montage expérimental

2.3 Principaux résultats

Etant donné qu'il n'existe pas à notre connaissance de base de données de référence sur les propriétés optiques des matériaux soumises au rayonnement térahertz, nous avons effectué ces mesures dans notre laboratoire. Plusieurs expériences ont été réalisées afin de caractériser l'absorbance de 10 matériaux standards de construction (voir la figure 3). Les résultats expérimentaux (valeurs de k le coefficient d'absorption et A l'absorbance) sont présentés dans le tableau 1. Les écarts types des valeurs de I_0 l'intensité du signal d'entrée et I_t l'intensité du signal de sortie sont respectivement de 1.3% et 0.3%. Ces faibles valeurs garantissent la précision des mesures. Une étude des incertitudes de mesure a été prévue ultérieurement.

Tous les matériaux testés sont plus ou moins perméables aux térahertz (tableau 1), même pour des épaisseurs importantes. Plus la valeur de k est faible et plus les matériaux sont transparents. Certains matériaux, par exemple la laine de verre et le polystyrène extrudé, ont une valeur k similaire : ainsi la mesure ne permet que d'identifier une classe de matériaux. A contrario, d'autres matériaux sont aisément distinguables, par exemple le béton a une caractéristique très différente des matériaux isolants.

Les ondes térahertz permettent donc potentiellement d'identifier la nature et les propriétés thermiques d'un mur de construction. La valeur k varie en fonction de la fréquence de la source ; des signaux multi-spectraux de forte puissance seront utilisés par la suite, et des matériaux plus denses caractérisés.

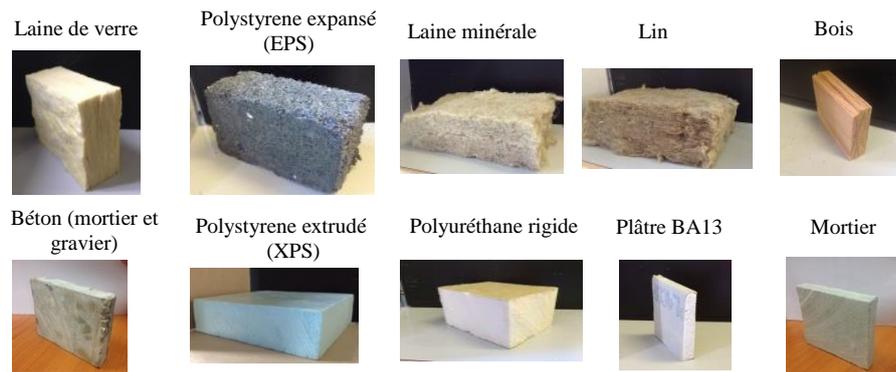


Figure 3: Matériaux de construction standards caractérisés

	$L(cm)$	$I_t/I_0 (%)$	k	A
Laine de verre	10	69.91	0.0155	0.1555
Polystyrène expansé (EPS)	10	93.45	0.0029	0.0294
Laine minérale	7.2	55.61	0.0354	0.2548
Lin	7.2	74.12	0.0181	0.13
Bois	0.96	22.56	0.6735	0.6466
Béton (mortier et gravier)	1.83	1.74	0.9618	1.7601
Polystyrène extrudé (XPS)	5.9	84.03	0.0128	0.0756
Polyuréthane rigide	8.2	91.18	0.0049	0.0401
Plâtre (BA13)	1.25	49.23	0.2462	0.3078
Mortier	1.66	1.03	1.1946	1.9890

Table 1: Longueurs et caractéristiques mesurées des différents matériaux

Certains matériaux (bois et plâtre BA13) ont été caractérisés sur des épaisseurs variables (tableau 2). Le coefficient d'absorption reste quasiment constant quelle que soit l'épaisseur considérée, en accord avec la loi de Beer-Lambert.

Des parois constituées de plusieurs couches de matériaux ont aussi été testées (table 3). Les valeurs de k et de A ne semblent pas dépendre de la structure de l'échantillon (ordre des couches et séparateur). Cette méthode ne permet donc pas de distinguer la structure et la position des constituants dans le cas d'un matériau multicouches.

	$L(cm)$	k	A		$L(cm)$	k	A
 BA13	1.25	0.2470	0.3078	 bois	0.32	0.5066	0.1621
	2.5	0.2328	0.5821		0.64	0.6207	0.3972
	3.75	0.2156	0.8083		0.96	0.6735	0.6466
	5	0.2308	1.1541				

Table 2: Relevés pour plusieurs épaisseurs

	Structure	$L(cm)$	k	A
 BA13 + Laine de verre	IP/5.3cm+2.5cm	7.8	0.085641	0.668
	PI/2.5cm+5.3cm	7.8	0.083423	0.6507
	IP/5.3cm+1.25cm	6.55	0.057252	0.375
	PI/1.25cm+5.3cm	6.55	0.045664	0.2991
	IP/4cm+2.5cm	6.5	0.110907	0.7209
	IPIP/2+1.25+2+1.25cm	6.5	0.144738	0.9408
 Polystyrène + plâtre	IP/10cm+1cm	11	0.033173	0.3649
	PI/1cm+10cm	11	0.033955	0.3735
 Laine minérale + plâtre	IP/3.6cm+2.5cm	6.1	0.105016	0.6406
	PI/2.5cm+3.6cm	6.1	0.120984	0.738

Table 3: Résultats expérimentaux pour des matériaux multicouches (*IP: isolant sur la première face qui est face à l'émetteur térahertz, plâtre BA13 sur la seconde ; PI : ordre opposé*)

2. Premiers résultats de simulation de sondes thermiques

La méthode des sondes thermiques consiste à appliquer sur une face externe de la paroi à analyser un échelon de flux de chaleur calibré (par effet Joule), et à analyser la réponse de température transitoire de la même face.

La méthode pour simuler et analyser ce genre de réponse est la méthode des quadrupoles thermiques^[17].

Nous donnons ici quelques résultats typiques de différents multicouches typiques du domaine du bâtiment (voir Fig. 4). Dans la simulation, la source de chaleur est 10 W/m^2 . Les propriétés thermiques des matériaux sont présentés dans le tableau 4.

Matériau	Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Densité ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Capacité thermique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Epaisseur (cm)
----------	--	--	---	-------------------

Béton	1.65	2200	1000	10/infinite
Isolation	0.039	35	1030	10
Plâtre	0.25	900	1000	1.25

Table 4 Propriétés thermiques des matériaux

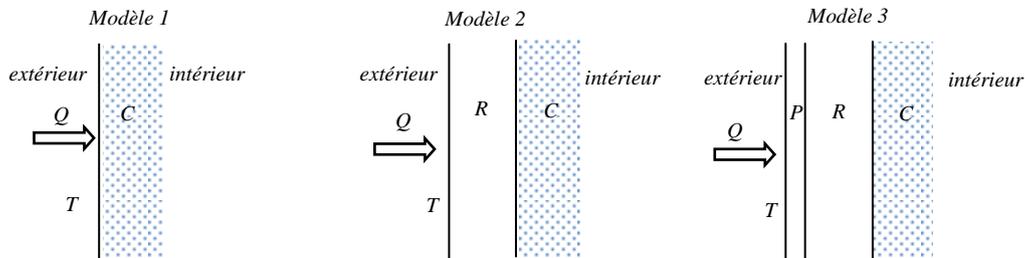


Figure 4: Trois modèles de parois : C est du béton; R représente la couche d'isolation; P est la couche de plâtre ; T est la température de surface des parois ; Q est la source chaude.

Les résultats de simulation sur une paroi de béton servant de support (voir Fig. 5) montrent que ce sont surtout les temps courts (ici quelques heures) qui permettent de caractériser les premières couches du mur. La méthode thermique permet de savoir si les premières couches sont isolantes légère, isolante et faiblement capacitive ou si la première couche est au contraire fortement effusive. Ces indications sont très complémentaires de l'analyse par rayonnement térahertz.

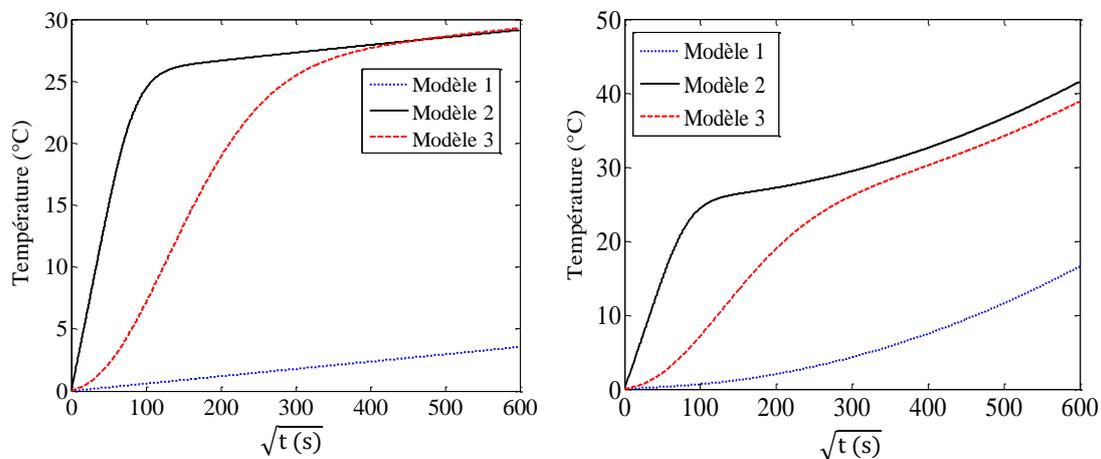


Figure 5: Simulations de température de surface pour les trois types de parois sous condition semi-infinie (gauche) and adiabatique (droite)

3. Conclusion

Les premiers résultats de cette étude sont encourageants car la majeure partie des matériaux testés sont suffisamment transparents au rayonnement terahertz pour caractériser de fortes épaisseurs de murs (même en béton). Dans le futur, des sources terahertz de plus forte puissance peuvent encore permettre d'améliorer la sensibilité de la méthode. La méthode de sonde thermique plane permet alors d'être utilisée pour des temps raisonnables (quelques heures) et de donner une information complémentaire sur la position et la nature des couches isolantes.

Références

- [1] Ashish Y. Pawar, Deepak D. Sonawane, Kiran B. Erande, Terahertz technology and its applications, *drug invention today* 5 (2013), 157-163.
- [2] Aftab Ahmad, Mohammed Maslehuddin, Luai M. Al-Hadhrami, In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls, *Energy and Buildings* 84 (2014), 132–141.
- [3] Rossano Albatici, Arnaldo M. Tonelli, Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, *Energy and Buildings* 42 (2010), 2177–2183.
- [4] Khaled Chaffar, Alexis Chauchois, Didier Defer, Thermal characterization of homogeneous walls using inverse method. *Energy and Buildings* 78 (2014), 248–255.
- [5] Tribikram Kundu, *Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization: Engineering and Biomedical Applications*, Chapter 15, Presses CRC (2012).
- [6] Michael Shur, Terahertz technology: devices and applications, *Proceedings of ESSDERC*, Grenoble, France (2005), 13-21.
- [7] Ehsan Kabiri Rahani, Tribikram Kundu, Ziran Wu, et al, Heat Induced Damage Detection by Terahertz (THz) Radiation, *J Infrared Milli Terahz Waves*, 32 (2011), 848–856.
- [8] Ehsan Kabiri Rahani, Tribikram Kundu, Ziran Wu, et al, Mechanical Damage Detection in Polymer Tiles by THz Radiation, *IEEE SENSORS JOURNAL*, 11(2011), 1720-1725.
- [9] Christopher D. Stoik¹, Matthew J. Bohn¹ and James L. , et al, Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy, *OPTICS EXPRESS*, (2008), 17039-17051.
- [10] Mira Naftaly, Robert E. Miles, Terahertz Time-Domain Spectroscopy for Material Characterization, *Proceedings of the IEEE*, 95(2007), 1657-1665.
- [11] Andreja Abina, Uros Puc, Anton Jeglic, et al, Structural analysis of insulating polymer foams with terahertz spectroscopy and imaging, *Polymer Testing*, 32 (2013) 739–747.
- [12] Andreja Abina, Uros Puc, Anton Jeglic, et al, Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging, *NDT&E International*, 77(2016), 11–18.
- [13] R. Piesiewicz , C. Jansen , S. Wietzke , et al, Properties of Building and Plastic Materials in the THz Range, *Int J Infrared Milli Waves*, 28(2007), 363–371.
- [14] Antonio Costanzo, Mario Minas, Giuseppe Casula, et al, Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building, *Sensors*, 15(2015), 194-213.
- [15] Yutaka Oyama, Li Zhen, Tadao Tanabe, et al, Sub-terahertz imaging of defects in building blocks, *NDT&E International* 42 (2009), 28–33.
- [16] Nicholas Karpowicz, Hua Zhong, Jingzhou Xu, Comparison between pulsed terahertz time domain imaging and continuous wave terahertz imaging, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, *Semicond. Sci. Technol*, 20 (2005), S293–S299.
- [17] D. Maillet, S. Andre, J.C. Batsale, *Thermal quadrupoles-solving the heat equation through integral transforms*, Presses WILEY (2000).

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au *China Scholarship Council (CSC)* pour l'allocation de bourse de thèse de Yang Yingying. Une autre partie de ces travaux a été financée par le projet européen Built2Spec.