



### **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/10985/6622>

#### **To cite this version :**

Christophe PRADERE, Jean-Pascal CAUMES, Daniel BALAGEAS, Jean-Christophe BATSALE -  
Nouveau concept de caméra TeraHertz à température ambiante basé sur la thermo-conversion  
de photons couplée à une caméra InfraRouge - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Nouveau concept de caméra TeraHertz à température ambiante basé sur la thermo-conversion de photons couplée à une caméra InfraRouge.

C. PRADERE\*, J.P. CAUMES, D. BALAGEAS et J.C. BATSALE

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

\* (auteur correspondant : christophe.pradere@bordeaux.ensam.fr)

**Résumé** - La technologie THz a été largement appliquée pour ces nombreuses potentialités dans les domaines de la physique, de la biologie ou encore de la médecine. Le point de développement clé concerne aujourd'hui l'imagerie en temps réel multispectrale dans un domaine particulier (10-3000  $\mu\text{m}$ ). Si de nombreux systèmes existent sur une base tout-optique [1,2], l'extension de la technologie IR dans le domaine THz est prometteuse [3-4]. Dans ce travail, nous proposons un système de conversion de photons THz en photons IR sur une large bande spectrale. L'intérêt majeur de ce type de convertisseur réside dans la possibilité d'obtenir un système imageur multispectral IR-IR ou IR-THz à partir d'une seule et même caméra IR commerciale. Les premières réalisations expérimentales ont permis la métrologie spatiale d'une source TeraHertz millimétrique (0.110 THz). Par la suite, deux exemples d'imagerie THz, à température ambiante, en temps réel, ont été démontrés à l'aide de ce nouveau système.

## 1. Introduction

La position spectrale du rayonnement TeraHertz est parfaitement illustrée par les deux filières technologiques développées autour des caméras THz à la frontière de l'optique (infrarouge) et de l'électronique [5] (onde millimétrique, micro-onde, radars ...). Tout d'abord, la filière électronique, elle consiste à adapter des solutions tout électroniques, à forte maturité technologique de la communauté des ondes « radar ». Elle fournit aujourd'hui des détecteurs performants en sensibilité mais difficilement intégrables en matrice (électronique lourde, nombre de pixels limités, ...). Ces développements sont à l'origine des scanners corporels d'aéroport aujourd'hui industrialisés. Ensuite, la filière thermique, elle consiste à adapter la sensibilité des détecteurs infrarouges (micro-bolomètres). Cette technologie a permis de démocratiser les détecteurs thermiques dans le domaine civil et semble tout à fait légitime pour une extension dans le domaine THz (2 - 10 THz). Ils sont modifiés directement sur le capteur (dépôt d'une couche mince, couplage avec des antennes, adaptation de la technologie CMOS). Ces techniques sont gourmandes en coût de fabrication (instrumentation et procédés électroniques en salle blanche) et sont limitées en termes de gamme spectrale.

Au delà de ces deux filières, nous avons basé notre développement sur l'extension de la thermographie infrarouge «classique» (3 - 20  $\mu\text{m}$ ) vers un spectre de longueurs d'ondes plus large (1-3000  $\mu\text{m}$ ) exploitant leur maturité et leur intégration industrielle. Nous donnons ainsi une nouvelle dimension pour l'imagerie scientifique 2D et 3D (tomographie), le contrôle et l'inspection non-destructive et non-invasive de matériaux diélectriques opaques (céramique, composite, bois, tissu...) employés dans de nombreux domaines industriels.

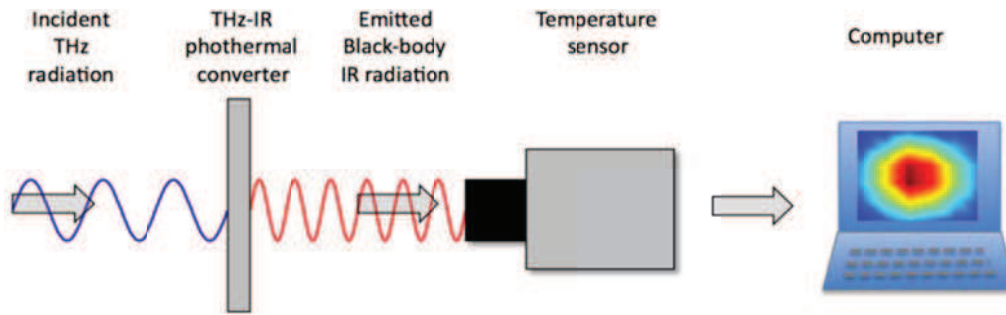


Figure 1. Schéma de principe de détection à l'aide d'un thermo-convertisseur TéraHertz

Pour cela, sur la même base que les écrans à scintillations convertissant le rayonnement X en photons visibles (frequency down-conversion), nous proposons de réaliser la conversion inverse (frequency up-conversion) du rayonnement TeraHertz/millimétrique en photons infrarouges (figure 1). L'élément clef de notre système est ainsi le thermo-convertisseur. Sa fonction première consiste à absorber le rayonnement THz à l'aide d'un matériau optimisé et de le convertir en rayonnement infrarouge à travers l'augmentation de température induite. La métrologie thermique du thermo-convertisseur est ensuite finement quantifiée et résolue spatialement par un système de vision infrarouge.

Un premier prototype a été développé [3,4] et a permis les premières preuves de concept de l'adaptation du thermo-convertisseur sur les grandes filières de caméras infrarouges (quantique et micro-bolométrique) permettant une métrologie efficace d'un grand nombre de sources infrarouges et THz. Par ailleurs, nous montrerons qu'elle donne accès également à une imagerie THz 2D et 3D performante. Nous montrerons dans la suite que cette instrumentation présente une sensibilité de mesure de l'ordre de  $< 20 \text{ nW/Hz}^{1/2}$  et une résolution spatiale proche de la limite de diffraction ( $\lambda$ ). Ces spécifications et les configurations expérimentales choisies offre l'avantage d'imager des champs optiques importants ( $> 40 \times 40 \text{ mm}$ ) difficilement réalisable avec les technologies concurrentes. L'extension de l'utilisation des caméras thermiques dans de nouvelles bandes spectrales grâce au thermo-convertisseur offre des perspectives importantes pour la création et la mise au point de nouvelles méthodes de contrôle non-destructif en volume et à distance de défauts spécifiques millimétriques (délaminations, inclusions, inhomogénéités, usures, collages...) sur des structures de grandes tailles isolantes (composites, mousses, caoutchoucs, polymères, ...). Cette nouvelle méthode d'analyse par essence multispectrale montre « également un potentiel important dans le future pour la fusion de plusieurs systèmes d'imagerie (Visible, Infrarouge proche et lointain voire même des systèmes acoustiques).

## 2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de test est présenté sur la figure 2. Le module de thermo-convertisseur est directement attaché à la caméra thermique pour sa meilleure isolation thermique. Une fenêtre en teflon (opaque à l'IR) de 2 mm d'épaisseur ferme le module des éventuels rayonnements thermiques incidents dans l'axe de la caméra. La caméra infrarouge utilisée est une caméra commerciale (FLIR-SC7000) dédiée aux applications de métrologie scientifique. Refroidis par Sterling, elle est spécialement conçue pour la bande de fréquence 3-5  $\mu\text{m}$ . L'objectif infrarouge, où a été placé le thermo-convertisseur, a une focale de 25 mm avec une distance de travail de 125 mm ( $\text{NA}=0.2$ ). Le champ optique infrarouge mesuré dans le plan du thermo-convertisseur est de l'ordre de  $70 \times 70 \text{ mm}^2$  avec une résolution de l'ordre de 125  $\mu\text{m}$ . Un objectif TéraHertz composé de trois lentilles (teflon) image le plan objet sur le thermo-convertisseur avec un grandissement de 1. La distance de travail de l'objectif

Térahertz est de 80 mm avec un champ optique de 50 x 50 mm.

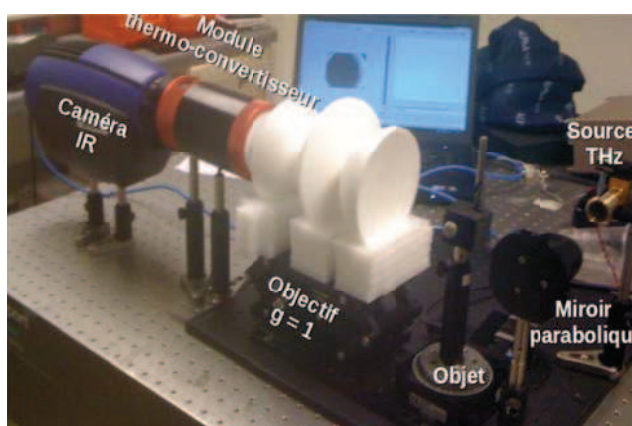


Figure 2. Photographie du montage expérimental utilisé pour le test de la caméra THz. (Configuration en imagerie (sans lentille de focalisation dans le plan objet de l'objectif TéraHertz) avec une source millimétrique de 20 mW émettant à 0.11 THz)

L'objet imagé par l'objectif TeraHertz sur le thermo-convertisseur est éclairé par une source TéraHertz monochromatique ( $\nu = 0.11$  THz soit  $\lambda = 2.8$  mm) d'une puissance de 20 mW. Le cornet de sortie présente une divergence de  $30^\circ$ , l'utilisation d'une parabole hors axe de 150 mm de focale permet ainsi de collimater le faisceau sur une taille de 30 x 30 mm. Pour la métrologie de faisceau présentée par la suite, une lentille de 60 mm de focale est insérée pour focaliser le faisceau TéraHertz dans le plan objet de l'objectif TéraHertz.

#### 4. Métrologie de deux sources millimétriques 0.08 et 0.11 THz

Les sources utilisées sont des diodes GUNN (RPG à 0.08 THz et ZAX à 0.11 THz) émettant respectivement à 50 et 20 mW (données fournisseurs). A l'aide du montage expérimental précédent, la mesure du faisceau THz de taille millimétrique ( $> 3$  mm) a été réalisée en utilisant une caméra infrarouge dédiée au domaine de longueur d'onde 3-5  $\mu\text{m}$  couplée au thermo-convertisseur. Le temps d'intégration de la caméra est de 1 ms avec une fréquence d'acquisition de 25 Hz, le signal caméra étant échantillonné sur 14 bits.

La figure 3 présente les résultats typiques obtenus pour la source de 0.11 THz. Chaque image en présence du faisceau est soustraite d'une image de bruit caméra acquise initialement. La figure 3a montre la cartographie thermique du thermo-convertisseur éclairé par le faisceau TeraHertz avec l'acquisition d'une seule image et la colonne 3b, l'acquisition moyennée sur 200 images (amélioration du rapport signal sur bruit -SNR- d'un facteur théorique égal à 14). Les profils de faisceau représentés par la figure 3 sont une moyenne spatiale dans la direction X ou Y de l'image. Le bruit sur la courbe non moyennée est de l'ordre de 0.1 niveau caméra alors que le bruit sur la courbe moyennée est de l'ordre 2, qui donne une amélioration de l'ordre de 20. Les bas niveaux de bruit sur la courbe empêchent une meilleure précision du calcul de SNR. Au final, le rapport SNR en acquisition « single-shot » est de l'ordre de 300 alors que le SNR avec une acquisition de 200 images (durée 8 s) est de l'ordre 4200.

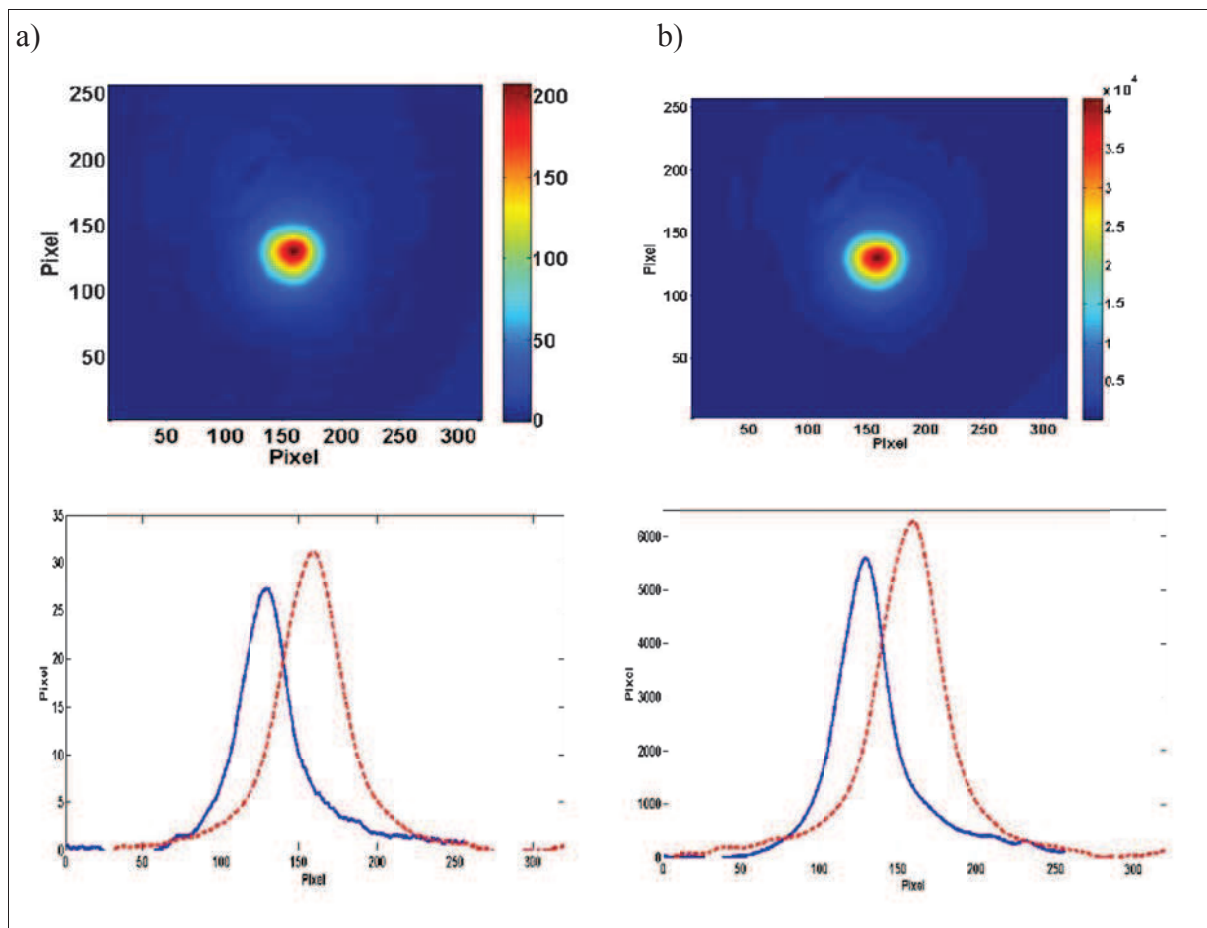


Figure 3. Métrologie d'un faisceau TeraHertz (0.11 THz, 20 mW).  
 Les colonnes a) et b) illustrent respectivement l'acquisition « single shot » à 25 Hz (temps d'intégration de 1 ms) et l'acquisition moyennée sur 200 images. Les images sont données en niveau de gris caméra et les axes spatiaux X et Y en pixel (1 pixel = 125  $\mu$ m).  
 Les profils sont moyennés suivant la direction X (horizontal, trait plein) et la direction Y (vertical en trait continu).

Notre instrumentation permet également une métrologie quantitative des faisceaux TéraHertz. En effet, avec une lentille de focale 60 mm et un faisceau collimaté de 30 mm (NA=0.2), le diamètre théorique au point de focalisation est de 6.1 mm. Nous mesurons sur les figures 3, un diamètre à mi-hauteur de 48 pixels correspondant à un diamètre de 6 mm en très bon accord avec la valeur attendue.

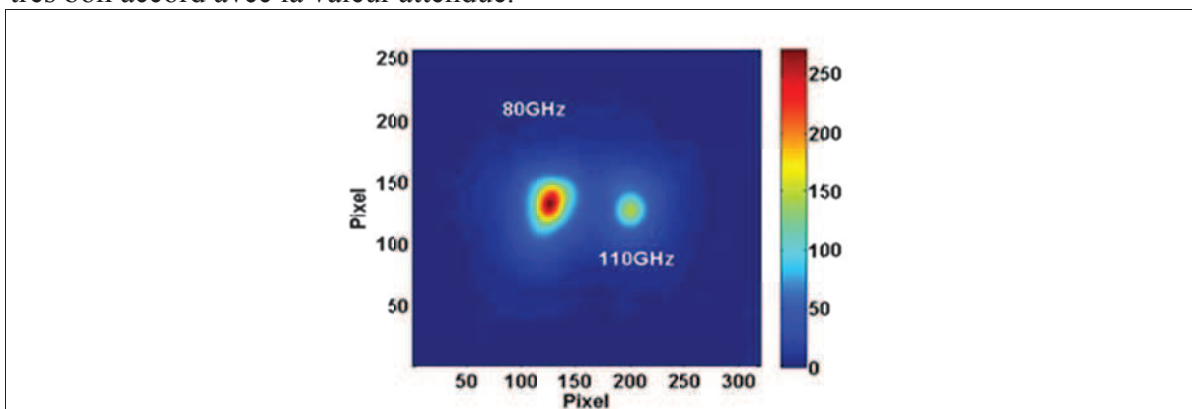


Figure 4. Métrologie d'un faisceau TeraHertz (0.11 THz, 20 mW et 0.08 THz, 50 mW) illustrant la potentialité multiplextrale de la caméra Terahertz.

Pour illustrer la potentialité de réaliser un système imageur multispectral, nous avons focalisé dans le plan objet le rayonnement issue de deux diodes Gunn de 0.11 THz et de 0.08 THz. L'acquisition simultanée des deux faisceaux est un résultat important par rapport aux autres technologies d'imagerie matricielle Téraherz. Les résultats sont présentés dans la figure 4.

#### 4. Applications à l'imagerie 2D Téraherz temps réel.

Nous avons appliqué la caméra THz à l'imagerie active en plein champ d'objets caractéristiques cachés derrière un ensemble d'isolants (carton, teflon, ...). Suivant le montage présenté sur la figure 2, le faisceau collimaté éclaire les objets placés dans le plan objet de l'objectif THz. Le rayonnement transmis est alors imagé sur le thermo-convertisseur. Les deux objets testés sont une lettre T découpé dans une plaque de teflon de 5 mm et une grille métallique avec des trous de 3 mm de diamètre et distant de 3 mm (dimensions caractéristique de l'ordre de  $\lambda$ ).

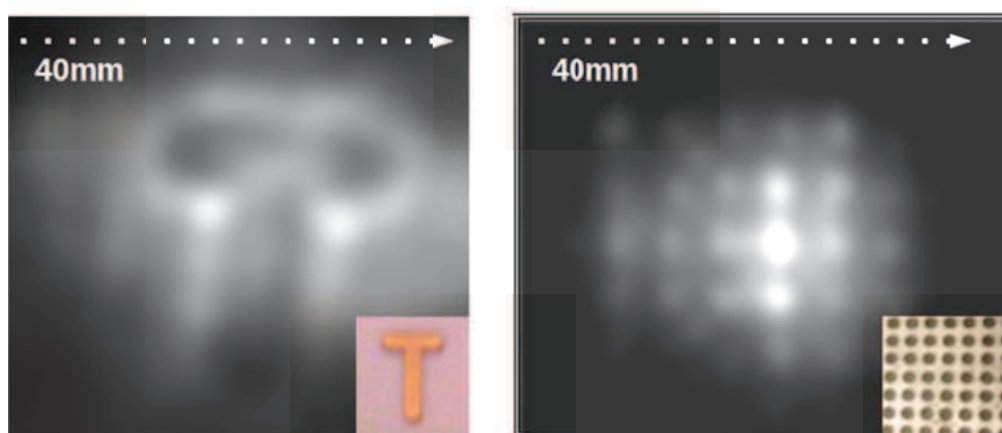


Figure5. Imagerie THz 2D (0.11 THz, 20 mW) d'une lettre T en TEFLON et d'une grille métallique trouée cachées respectivement dans du CARTON (10 mm) et du TEFLON (5 mm).

La figure 5 représente les images enregistrées avec une moyenne de 100 images avec un temps d'intégration de 0.1 ms. Le rapport SNR des images est supérieur à 50 sur les images présentées. L'image de la grille montre une résolution spatiale proche de la limite de diffraction équivalente à  $2\lambda$ . La méthode d'imagerie active précédente est applicable en transmission comme en réflexion sur un champ optique de 50 x 50 mm avec des fréquences vidéo de 1 à 10 Hz. Avec en perspective un éclairage multispectral sur une large gamme de longueurs d'ondes, l'utilisation d'un thermo-convertisseur permet de nouvelles méthodes d'imagerie et ainsi l'inspection non-destructive d'objets opaques au visible ou à l'IR moyen. Cela nous conduit vers de nouvelles méthodes d'imagerie innovante combinant la thermographie au rayonnement Téraherz. Comme l'illustre la figure 6, le rayonnement Téraherz permet de détecter des éléments absorbant derrière des couches opaques au visible ou à l'IR. Pour le démontrer, nous avons placé du carbone sur une plaque de silicium de 1 mm d'épaisseur, elle-même collée sur une plaque de teflon. Le rayonnement Téraherz étant plus absorbé par le carbone que par le silicium ou le teflon, il est possible d'imager avec notre « caméra THz » les différents éléments. C'est une méthode très sélective qui permet par exemple d'imager hétérogénéité de la couche de carbone sur le Silicium.

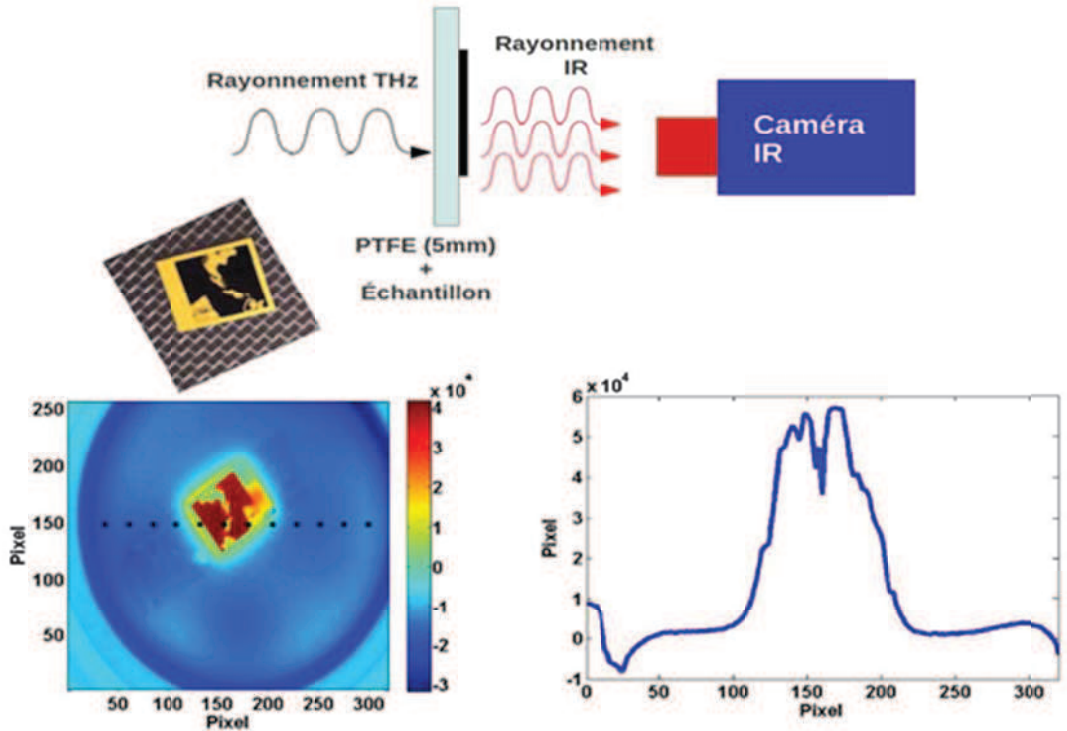


Figure 6. Combinaison du rayonnement THz avec l'imagerie thermique : Détection d'hétérogénéité de carbone sur une couche de Silicium derrière une plaque de Teflon. Le rayonnement THz est absorbé de manière sélective suivant les matériaux et fait apparaître par contraste les différents matériaux.

## 5. Conclusions-perspectives

Dans cet article nous avons montré la faisabilité de l'imagerie THz à partir du couplage entre une caméra IR et un système de conversion THz-IR. Les premiers résultats obtenus avec ce système sont très prometteurs pour la communauté des thermiciens. En effet, cela montre qu'il devient possible de réaliser de l'imagerie multispectrale (du visible au THz) avec une seule et même caméra IR. Bien entendu, cela est aussi valable avec tous les types de détecteurs thermiques qui sont classiquement utilisés dans nos laboratoires comme les monodétecteurs IR, les pyromètres..... Si cette application est aujourd'hui limitée en sensibilité par la puissance des sources THz existantes (20 mW), on peut imaginer que demain, avec l'augmentation et la banalisation de ce type de sources, des systèmes de plus haute puissance et de plus faible coût seront disponibles ce qui permet d'envisager une imagerie de très haute qualité et sur des surfaces de très grande taille. De même l'utilisation de sources multispectrales devrait nous permettre une analyse de la composition des matériaux, ce qui enrichit encore le domaine d'utilisation des caméras IR. Enfin, il apparaît clairement que les perspectives de ce travail sont très importantes pour un grand nombre de domaines d'applications. Pour citer qu'un exemple, on peut envisager toutes les applications de type contrôle non destructif ou il devient désormais possible de tomographier des objets et donc de ne pas se restreindre à une mesure de surface comme c'est le cas aujourd'hui en thermique. De plus, il est possible de superposer l'information de température avec l'information optique THz (transparence, absorption...) ainsi que l'information spectrale, tout cela avec un même outil de mesure.

## Références

- [1] W. L. Chan, J. Deibel and D. M. Mittleman, Rep. Prog. Phys. 70, 1325-1379 (2007)
- [2] J-P. Caumes, B. Chassagne, D. Coquillat, F. Teppe and W. Knap, Electron. Lett., 45, (2009)
- [3] C. Pradere, J-P. Caumes, B. Chassagne, J.C. Batsale, Patent N° FR 0952097, Apr. 2009
- [4] C. Pradere, J.-P. Caumes, D. Balageas, S. Salort, E. Abraham, B. Chassagne, and J.-C. Batsale, Quant. InfraRed Thermogr. 7, 217–235 (2010).
- [5] D. Balageas, P. Levesque, “EMIR: a photothermal tool for electromagnetic phenomena characterization”, Rev. Générale de Thermique, Vol. 37, 1998, pp. 725-739.