

ÉNERGIE

TELECOMMUNICATIONS

SIGNAL

COMPOSANTS

AUTOMATIQUE

INFORMATIQUE

**DOSSIERS**

# TIC et énergie



## Sonder la matière par les ondes électromagnétiques

L'ARTICLE **INVITÉ**

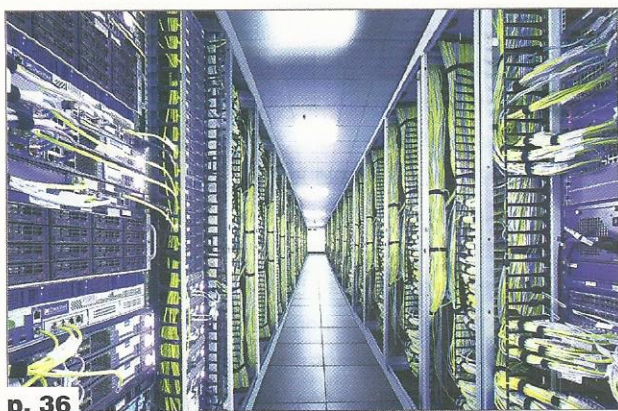


**Certificats d'économie d'énergie**  
Par Stéphane Signoret,  
Daniel Cappe





p. 1



p. 36



p. 75



p. 23



p. 111



p. 135

## 1 EDITORIAL

Une période de transitions... de transformations !

Par Guillaume Poupard

## 2 SOMMAIRE

## 4 FLASH INFOS

Une avancée majeure en supraconductivité à haute température ?

5 Vers des disques optiques de 30 To grâce à la technologie SPIN :  
"Superresolution photoinduction-inhibited nanolithography"

8 La plus puissante éolienne flottante bientôt en service au Japon

9 L'éclipse du 20 mars 2015 : un succès de la coopération  
entre gestionnaires de réseaux électriques

10 On peut réduire de 30 % les émissions de méthane du bétail

11 Le deuxième satellite « Sentinel » en orbite

13 Actualités autour des fermions de Majorana

## 17 ACTUALITÉS

L'année de la lumière en France

## 18 A RETENIR

Congrès et manifestations

## 20 VIENT DE PARAÎTRE

La REE vous recommande

## 23 ARTICLE INVITÉ

Certificats d'économie d'énergie

Par Stéphane Signoret, Daniel Cappe

## 36 LE GRAND DOSSIER

**TIC et énergie**

*Introduction*

Par Patrice Collet

39 *Technologies numériques et environnement*

Par Cédric Gossart, René Garello

45 *Comprendre les défis énergétiques des technologies  
de l'information & de la communication*

Par Philippe Richard

54 *Les data centers*

Par Jean-Pierre Hauet

67 *Économies d'énergie et réduction des émissions de CO<sub>2</sub>,  
Objectifs et plans d'action du Groupe Orange*

Par Jean-Claude Bourgoing, Ahmed Zeddami

Photo de couverture : © djahan - Fotolia.com

## 75 DOSSIER URSI 2015

### Sonder la matière par les ondes électromagnétiques

Introduction : Les ondes électromagnétiques pour sonder la matière - Des applications à large spectre au service de l'homme

Par Cyril Lupi, Alain Priou

78 Mesure de la réfractivité atmosphérique par radar météorologique. Comparaison avec un réseau de capteurs au sol

Par Ruben Hallali, Francis Dalaudier, Gilles Guillemain, Alain Moreau, Jacques Parent du Châtelet

87 Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon Nostradamus - Un fleuron technologique français au service de la science

Par Jean-François Degurse, Jean-Philippe Molinié, Véronique Rannou, Sylvie Marcos

99 Imagerie térahertz avec capteurs à ondes de plasma. Application au contrôle non destructif volumique

Par Meriam Triki, T. Antonini, C. Archier, B. Moulin, F. Teppe, P. Solignac, N. Dyakonova, W. Knap

104 Capteurs à fibre optique pour la surveillance et l'observation du stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde

Par Sylvie Delepine-Lesoille, Stéphanie Leparmentier, Jean-Louis Auguste, Georges Humbert

## 111 GROS PLAN SUR ...

Présent et futur de la guerre électronique passive

Par Jean-François Grandin, Jean-Marc Chabroux

## 125 RETOUR SUR ...

Les travaux sous tension – 50 ans d'expérience en France

Par Fabrice Martin

## 135 ENTRETIEN AVEC...

Jean-Marie Simon

Directeur Général d'Atos-France

Cloud computing, Big Data, cybersécurité : la troisième révolution digitale vue par Atos

## 139 ENSEIGNEMENT & RECHERCHE

La pédagogie dans l'enseignement supérieur : tendances et enjeux

Par Denis Lemaître, André Thépaut

145 Echos de l'enseignement supérieur

Par Bernard Ayrault

## 147 CHRONIQUE

L'idée de dieu n'est plus ce qu'elle était...

Par Bernard Ayrault

## 148 LIBRES PROPOS

Fabriquer de l'estime

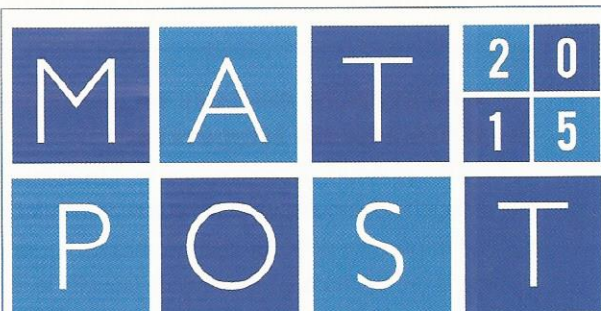
Par Michel Berry

152 Évolution du secteur des Télécommunications : le cas européen

Par Jean-Philippe Vanot

## 155 SEE EN DIRECT

La vie de l'association



# 5<sup>ÈME</sup> CONFÉRENCE EUROPÉENNE SUR LES MATÉRIELS DE POSTES HAUTE ET MOYENNE TENSION

24 & 25  
NOVEMBRE  
LYON  
ESPACE TÊTE D'OR

Organisée par :



[www.matpost2015.org/](http://www.matpost2015.org/)

# Imagerie térahertz avec capteurs à ondes de plasma

## Application au contrôle non destructif volumique

PAR MERIAM TRIKI<sup>A</sup>, T. ANTONINI<sup>A</sup>, C. ARCHIER<sup>A</sup>, B. MOULIN<sup>A</sup>, F. TEPPE<sup>B</sup>,  
P. SOLIGNAC<sup>B</sup>, N. DYAKONOVA<sup>B</sup>, W. KNAP<sup>B</sup>

T-WAVES TECHNOLOGIES<sup>A</sup>, LABORATOIRE CHARLES COULOMB (L2C), UMR CNRS 5221, UNIVERSITÉ MONTPELLIER II<sup>B</sup>,  
AUTEUR PRINCIPAL<sup>1</sup>

**ABSTRACT** *The aim of this report is to present potential interest of a new technology of sensor for measuring terahertz radiation and its application as imaging systems as a volumetric, safe, contact free and real-time non-destructive testing systems. These systems could be easily integrated in industrial facilities allowing the detection of surface, subsurface and in-depth defects in a variety of composite materials (dielectric, polymer, composite, ceramics...). Our optical setups are based on the use of High-Electron-Mobility Transistors (HEMT) as compact sensitive and rapid detectors operating at room temperature. The physical bases that explain the functioning of these sensors will be discussed. Our imaging systems and results of some case studies will be presented.*

### Introduction

Les ondes électromagnétiques (EM) térahertz (THz) correspondent au domaine spectral situé entre l'infrarouge lointain et les hyperfréquences. Elles sont associées à une gamme de fréquences comprise entre 0,1 THz et 30 THz ou encore à des longueurs d'ondes dites sub-mm comprises entre 0,01 mm et 3 mm. L'énergie des photons térahertz est de l'ordre du meV. C'est une énergie très faible, environ 1 000 fois plus petite que celle des transitions entre niveaux électroniques des atomes, et même plus faible que l'énergie thermique à température ambiante ( $k_B T \approx 27$  meV,  $k_B$  la constante de Boltzmann  $\approx 1,38 \times 10^{-23}$  J/K). L'interaction entre les ondes térahertz et la matière ne peut mettre en jeu que des phénomènes peu énergétiques. Ces ondes ont la particularité de traverser un grand nombre de matériaux opaques aux longueurs

d'ondes visible et infrarouge (exemples : vêtements, papier, bois, carton, plastiques...) et être absorbées par les matériaux conducteurs et les liquides polaires comme l'eau. De nombreuses molécules présentent une signature spectrale spécifique qui souvent n'existe pas dans d'autres régions du spectre électromagnétique comme le proche ou le moyen infrarouge. Par ailleurs les ondes térahertz sont non ionisantes à la différence des rayons X, elles sont capables de pénétrer la matière organique ou inorganique sans induire de dommages.

Toutes ces caractéristiques permettent aux ondes térahertz de présenter un intérêt d'une part pour la spectroscopie, permettant la caractérisation de certaines propriétés structurales de la matière ou l'identification de composés chimiques dans les matériaux, et d'autre part pour l'imagerie qui peut fournir des analyses aussi bien en surface qu'en volume.

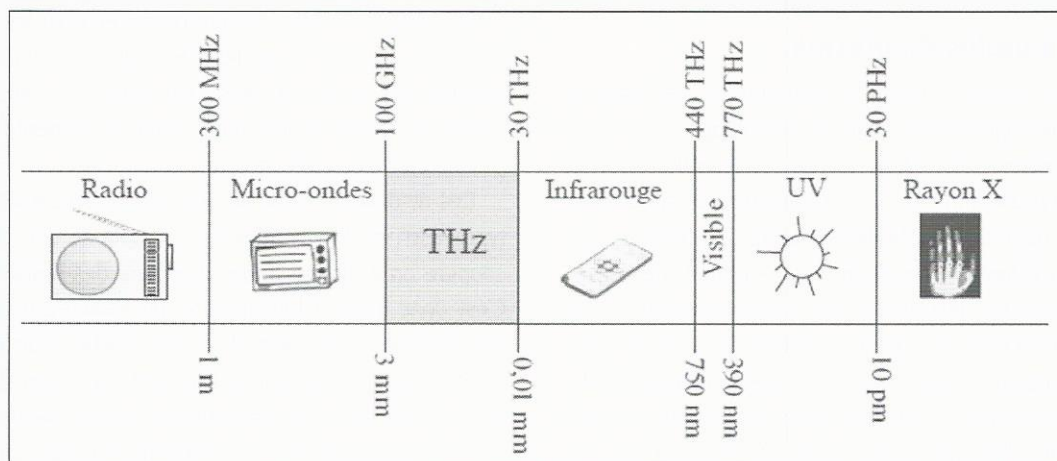


Figure 1 : Localisation schématique des ondes térahertz dans le spectre électromagnétique.

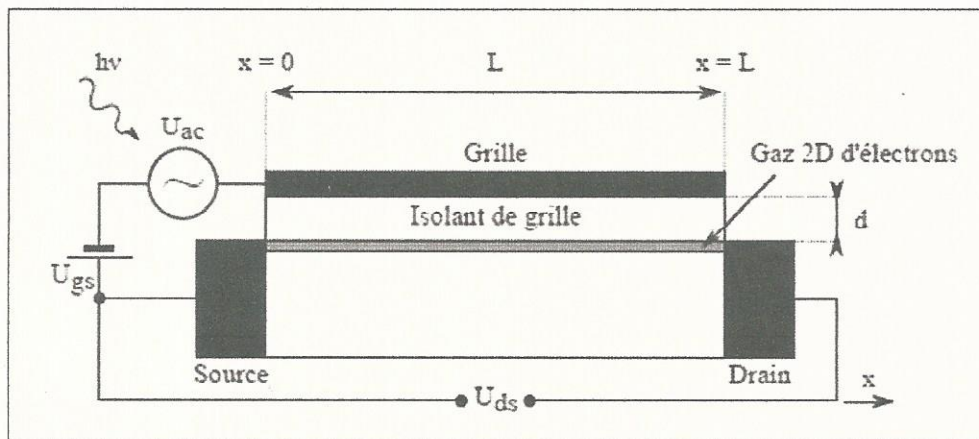


Figure 2 : Représentation d'un transistor à canal 2D d'électrons excité par une onde électromagnétique externe – Source : Twaves.

Les ondes térahertz ont été longtemps cantonnées aux secteurs de l'observation astronomique et de la physique de la matière condensée. Mais au fil du temps, certains paliers technologiques ont été franchis pour les sources et les capteurs du domaine. Des avancées ont été réalisées à plusieurs niveaux : fréquences d'accès, gammes de balayage en fréquence, fonctionnement à température ambiante, rapidité, stabilité, sensibilité, compacité et coût. Ceci permet d'envisager aujourd'hui la conception de systèmes optoélectroniques térahertz pour répondre à la fois à de nombreuses applications et attentes de divers secteurs académiques et industriels notamment pour le contrôle en ligne de la qualité et de la production d'une large gamme de matériaux.

L'imagerie et la spectroscopie térahertz ont de fortes potentialités d'applications dans plusieurs domaines tels que la sécurité, la défense, l'environnement, la santé, l'agronomie, l'agroalimentaire, la biologie, etc. Les ondes THz peuvent être en effet utilisées pour étudier les mutations génétiques, identifier des drogues et médicaments, identifier des tumeurs cancéreuses et des caries dentaires, étudier le stress hydrique des plantes et la vibration des membranes cellulaires ou de microtubules.

### Capteurs à ondes de plasma

Il existe un certain nombre d'émetteurs et de capteurs térahertz technologiquement matures, développés au niveau international (micro-bolomètres [1] ; diodes schottky, Gunn et Impatt [2] ; pyroélectriques [3]...) possédant des spécificités intéressantes pour des applications ciblées. Cependant, ces technologies existantes possèdent pour la plupart des désavantages tels qu'une utilisation à très basse température, un coût élevé, une faible vitesse de modulation ou encore des difficultés d'intégration dans les circuits électroniques usuels. La technologie capteur à ondes de plasma [4] développée en partenariat entre l'équipe de recherche « Spectroscopie THz et métrologie quantique » du laboratoire Charles Coulomb de

l'université de Montpellier et la start-up "T-Waves Technologies", présente les caractéristiques adéquates à son utilisation dans des systèmes d'imagerie compactes, peu coûteux, fonctionnant à température ambiante et en temps réel. De plus, cette nouvelle technologie détient le record du monde de sensibilité à 0,3 THz depuis 2011 [5].

### Éléments théoriques

La technologie des capteurs à ondes de plasma repose sur l'exploitation des propriétés collectives des électrons dans un transistor de dimension nanométrique. Dans les matériaux conducteurs, le plasma est un gaz électriquement neutre dont les particules libres, les électrons, sont chargées négativement et les ions, positivement. Les ondes de plasma sont des oscillations (spatiales et temporelles) de la densité d'électrons se déplaçant dans le matériau. La fréquence de ces « vagues d'électrons » dépend du nombre de particules et des dimensions du matériau dans lesquelles elles se déplacent. Plus le dispositif est petit, plus la fréquence des ondes est élevée. Cette fréquence entre dans la gamme THz lorsque les dimensions du matériau deviennent nanométriques.

En 1993, ces idées ont été proposées par les professeurs Dyakonov et Shur et appliquées à des nanotransistors dans lesquels ces ondes de plasma peuvent être mises en résonance par l'action d'une onde térahertz incidente ou par l'application d'un courant continu.

Ces résonances plasmas permettent donc à des transistors type HEMT de fonctionner bien au-delà de leur fréquence de coupure en émettant ou en détectant des radiations THz [7]. C'est donc grâce à l'avènement des nanotechnologies qu'il a été possible 10 ans après le travail théorique de Dyakonov et Shur de prouver expérimentalement ces idées. En effet, en 2002, Knap et al. [8] démontrent successivement la détection THz résonante et non résonante dans des nanotransistors de GaAs. Depuis, un grand nombre de publications ont attesté

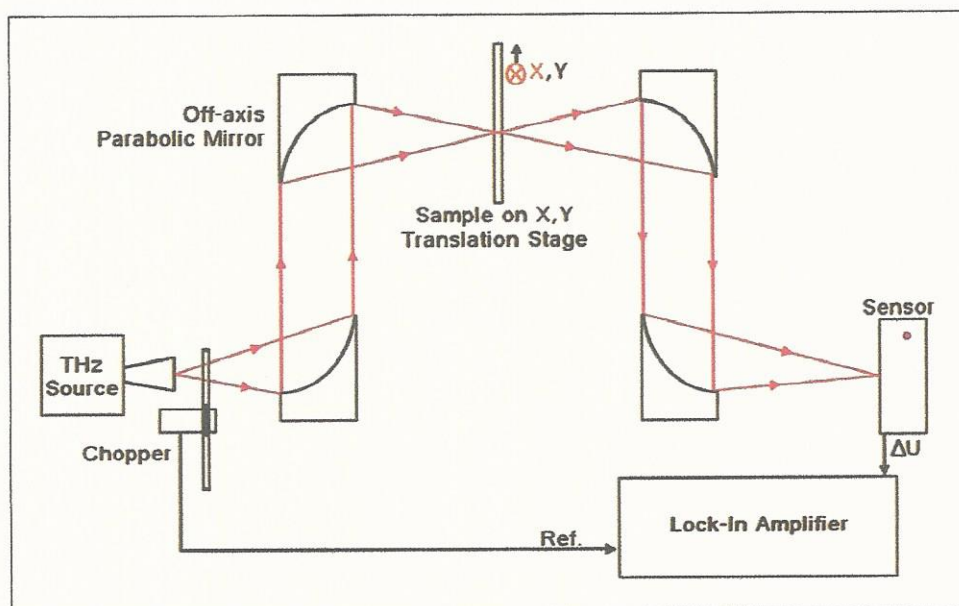


Figure 3 : Système d'imagerie 2D, mode transmission.

de la possibilité de concevoir des nanotransistors issus de différentes technologies pour détecter efficacement et rapidement des radiations THz. Aujourd'hui, le développement des procédés de fabrication et des nouvelles structures de transistors [9] permettent la détection d'ondes térahertz sur une large bande spectrale allant de 0,2 THz jusqu'à 4,3 THz [10], avec des sensibilités pouvant atteindre 80 kV/W [11]. Ces détecteurs sont maintenant utilisables dans des systèmes de communication et d'imagerie térahertz [5, 12] à faible coût, opérant à température ambiante et facilement intégrables dans des systèmes plus complexes et très rapides. Étant donné leur fréquence de modulation (on/off) de l'ordre de la dizaine de GHz, leur temps de réponse est donc très court, de l'ordre de la dizaine de ps.

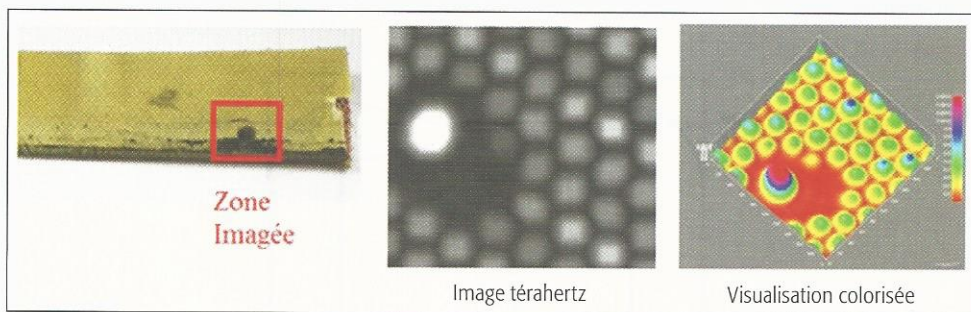
La figure 2 illustre le comportement d'un transistor à ondes de plasma. L'onde incidente est couplée entre la source et la grille du transistor, entraînant une modulation de la densité et de vitesse des porteurs de charge au sein du canal du transistor. Cette modulation est ensuite redressée entre le drain et la source en une tension continue, proportionnelle à l'amplitude de l'onde électromagnétique incidente. D'un point de vue pratique, c'est cette tension continue ( $U_{ds}$ ) qui est mesurée lorsque l'on utilise ces détecteurs, la tension grille source ( $U_{gs}$ ) servant alors à polariser le composant de façon à le placer dans son régime de détection optimale. Le transistor à ondes de plasma possède deux modes de fonctionnement dépendant des propriétés intrinsèques du matériau constituant le détecteur. Lorsque les électrons sont très mobiles dans le canal, l'onde de plasma peut alors se déplacer d'un bord à l'autre et se transformer en onde stationnaire, permettant une détection résonante et donc accordable par la tension

de grille. Lorsque les électrons sont peu mobiles, l'onde de plasma s'amortit, la résonance n'est plus possible et la détection devient large bande. Ce cas est classiquement utilisé en fonctionnant à température ambiante pour détecter des ondes entre 50 GHz et plusieurs THz.

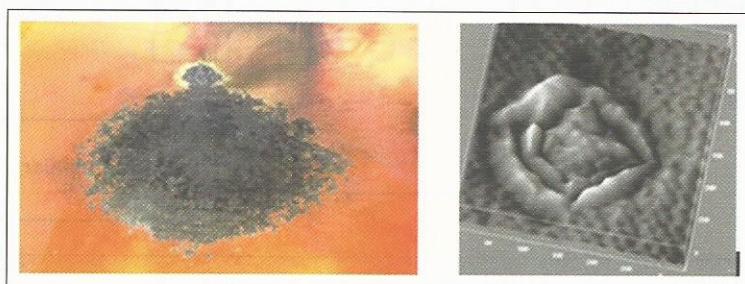
## Systèmes d'imagerie térahertz

### Version 2D

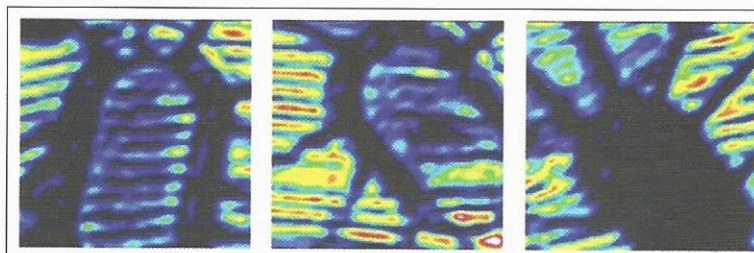
La société T-Waves Technologies a développé une version commerciale de capteur à onde de plasma destinée au monde de la recherche scientifique dans un premier temps et prévoit le développement d'un système d'acquisition d'images 2D à partir de ce capteur ponctuel et d'une table de translation XYZ pour répondre aux attentes de clients industriels en termes d'analyse de nouveaux matériaux, de mise au point de leurs procédés de fabrication et de contrôle qualité des matériaux ou produits finis. Une version 2D du système d'imagerie, basée sur l'acquisition point à point d'une mesure d'un signal térahertz, est déjà disponible en configuration de transmission (figure 3 (a)) et de réflexion. L'image 2D est acquise par déplacement XY d'un échantillon situé entre une source et un capteur térahertz. Ce déplacement est assuré par des platines de translation suivant des pas variant de 100  $\mu\text{m}$  à 500  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement térahertz étant pénétrant, les images 2D sont en fait des radiographies de l'objet à analyser ou peuvent être interprétées comme des cartes de densité volumique de ce dernier, et certaines propriétés peuvent alors être révélées comme la teneur en eau ou la présence de contamination et de défauts. Nous reportons dans la figure 4 plusieurs images térahertz obtenues avec nos systèmes d'imagerie version 2D.



(a) Endommagements sur panneau sandwich avec NIDA.

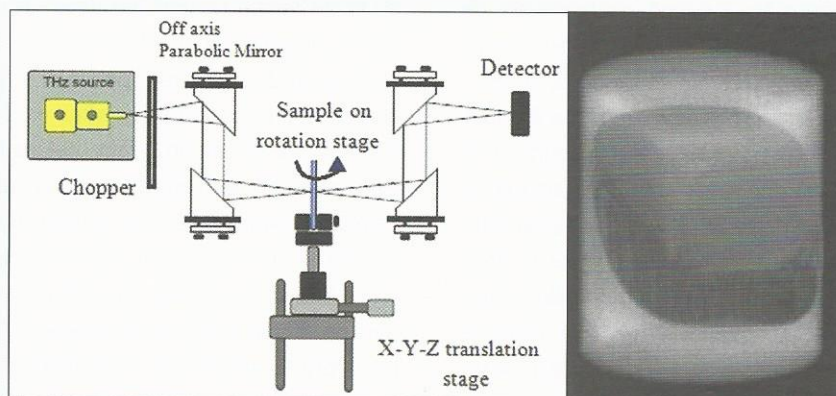


(b) Impact foudre sur composite en fibres de carbone.



(c) Défauts de soudure sur pièce composite en fibres de verre.

Figure 4 : Images térahertz 2D – Source : Twaves.



(a) Système d'imagerie.

(b) Image 3D d'un comprimé.

Figure 5 : Version 3D – Source : Twaves.

**Version 3D**

L'extension de cette version du système d'imagerie à un système 3D (figure 5) est en cours. Elle est basée sur l'acquisition de 36 images différentes de l'objet disposé sur une platine rotative avec un pas angulaire de 10 degrés.

**Perspectives**

Nous continuons nos efforts sur l'amélioration de la résolution de nos systèmes d'imagerie térahertz et l'extension de la gamme des configurations optiques associée pour pouvoir répondre au plus grand nombre d'applications possibles

à l'échelle académique et industrielle. Nous sommes en train de transférer la technologie de notre capteur ponctuel à un capteur linéaire, technologie qui nous permettrait un gain de temps considérable pour l'imagerie en particulier pour les grands objets. Enfin nous signalons que nos développements au niveau de différentes configurations possibles pour la spectroscopie térahertz sont également en cours d'évolution. Nous souhaitons développer une complémentarité entre les analyses issues de la spectroscopie et celles de l'imagerie dans le domaine térahertz pour le contrôle non destructif volumique de la matière.

## Références

- [1] Jonathan Oden & al., *Optics Express*, Vol. 21, Issue 4, pp. 4817-4825 (2013).
- [2] Ruonan Han & al., *IEEE Journal* 48, Issue 10, pp. 2296-2308 (2013).
- [3] Christopher W. Berry & al., arXiv:1412.6878 (2014).
- [4] Wojciech Knap & al., *Nanotechnology*, V. 24, no. 21, pp. 214002 (2013).
- [5] Franz Schuster & al., *Optics Express*, Vol. 19, Issue 8, pp. 7827-7832 (2011).
- [6] Michael Dyakonov & al., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 71, Issue 15, pp. 2465-2468 (1993).
- [7] Michael Dyakonov & al., *IEEE Transactions on Electronics Devices*, Vol. 45, no. 10, pp. 1640-1645 (1996).
- [8] Wojciech Knap & al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, no. 18, pp. 3433-3435 (2002).
- [9] Gregory C. Dyer et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 17, no.1, pp. 85-91 (2011).
- [10] Sebastian Boppel, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, no.12, pp. 3834-3843 (2012).
- [11] Erik Ojefors, *Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 44, no. 7, pp. 1968-1976 (2009).
- [12] S. Nadar, *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, pp. 054508 (2010).

## L'AUTEUR

**MERIAM TRIKI** est docteur en physique, spécialité physique de la matière condensée et du rayonnement. Elle jouit de neuf ans d'expérience en recherche et développement en optique, lasers, spectroscopie infra-rouge et visible, en développement et conception de systèmes optiques, caractérisation et mise au point de sources laser, modélisation et simulation de l'interaction onde-matière et en gestion de projets collaboratifs.