

Les applications émergentes des ondes Téraherertz

Par Ilarion PAVEL
CGE

Dans cet article, sont passées en revue les propriétés remarquables des ondes térahertz (THz), qui les rendent appropriées pour une grande diversité d'applications, ainsi que les diverses technologies nécessaires pour la mise au point de sources et de détecteurs dans la perspective d'une industrialisation de ces applications. En conclusion de cet article, sont donnés quelques éléments relatifs au marché du THz et un bref aperçu de la situation de la R&D en France.

Introduction

Les ondes térahertz (THz) sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence se situe entre 100 GHz et 30 THz, donc entre les micro-ondes et l'infrarouge (voir la Figure 1 ci-après), ce qui leur confère des propriétés remarquables.

L'énergie d'un photon THz est suffisamment grande pour garantir une bonne résolution optique, tout en étant suffisamment petite pour ne pas ioniser les tissus, ce qui rend les ondes THz particulièrement appropriées pour l'imagerie⁽¹⁾. Sur cette bande de fréquences se trouve le spectre d'absorption de nombreuses molécules, ce qui rend ces ondes appropriées pour la détection des traces de substances toxiques ou d'explosifs.

Les ondes THz pénètrent dans des matériaux diélectriques non conducteurs et sont réfléchies par les métaux, ce qui

leur ouvre des perspectives pour le contrôle non destructif ou pour des applications dans le domaine de la sécurité. Elles présentent également une forte absorption dans l'eau, d'où la possibilité de les utiliser dans les mesures d'hygrométrie.

Cependant, produire et détecter des ondes THz restent un grand défi technologique. Les fréquences THz situées dans la plage inférieure peuvent être émises par des circuits électroniques à base de transistors de commutation rapide, mais il est difficile d'obtenir de bons rendements au-dessus de 300 GHz. Celles situées dans la plage supérieure sont atteignables grâce à des lasers à semi-conducteurs. En revanche, il y a très peu de dispositifs à semi-conducteurs capables de fonctionner entre ces limites, avec des puissances et des rendements qui puissent les rendre commercialisables. C'est ce que l'on appelle le *gap térahertz*.

Il existe cependant des dispositifs à tubes électroniques à vide, traditionnellement utilisés pour générer des micro-ondes, que l'on peut modifier pour les faire fonctionner

(1) Une fréquence de 1 THz correspond à une énergie de photon de 4,1 meV (inférieure à l'énergie thermique à température ambiante qui est de 26 meV) et à une longueur d'onde de 0,3 mm.

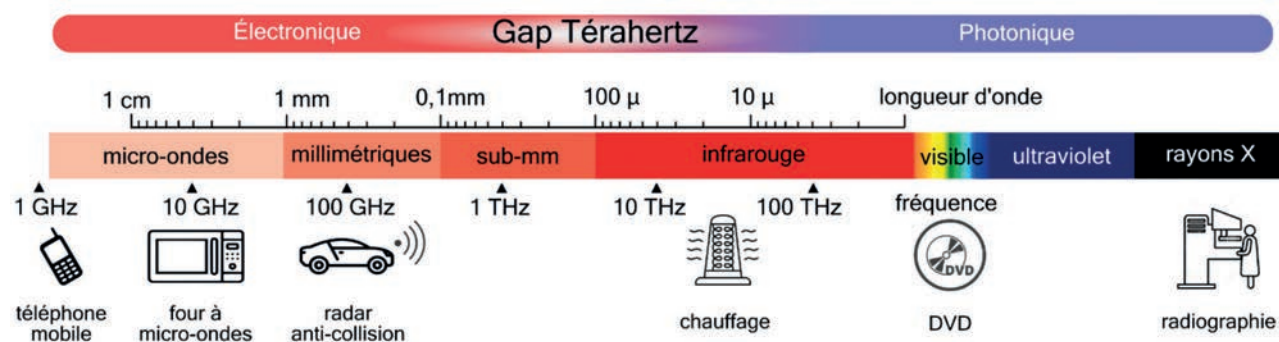


Figure 1 : Le « gap Téraherertz ». Il existe peu de sources capables d'engendrer des ondes électromagnétiques situées entre 300 GHz et 30 THz – Source : réalisée par l'auteur.

à des fréquences THz, comme le magnétron⁽²⁾, le gyrotron⁽³⁾ ou le carcinotron⁽⁴⁾. Mais la plupart de ces dispositifs soit se trouvent sous la forme de prototypes dans des laboratoires de recherche, soit ne sont pas suffisamment compacts pour être industrialisables dans le cadre d'une production de masse. Enfin, l'on dispose également de sources THz de grande puissance comme des synchrotrons ou des lasers à électrons libres⁽⁵⁾, mais il s'agit de grands instruments de recherche utilisés pour analyser des matériaux ou des molécules d'intérêt biologique.

Sources, détecteurs et systèmes

L'usage des ondes THz implique la mise au point des sources, détecteurs et autres composants nécessaires à la réalisation des systèmes d'analyse et de mesure. Malheureusement, il n'existe pas actuellement une source THz idéale, capable de fournir une puissance de l'ordre que quelques milliwatts, réglable sur une grande plage de fréquences THz et qui soit compacte et puisse fonctionner à température ambiante. On peut cependant envisager de mettre au point des sources spécifiques fondées sur diverses technologies et qui s'avèrent particulièrement adaptées à des applications précises.

Sources

Pour produire des ondes THz, on peut adopter deux stratégies.

Premièrement, on peut utiliser la technologie des micro-ondes, qui s'appuie sur divers composants électroniques de commutation rapide, comme les diodes Gunn, les diodes Impatt ou les diodes à effet tunnel résonant⁽⁶⁾, ou encore des transistors à haute mobilité d'électrons⁽⁷⁾.

(2) C'est le même type d'appareil qui équipe le four à micro-ondes : un filament cylindrique chauffé, situé au centre d'une cavité métallique sous vide, émet des électrons qui sont ensuite accélérés par une différence de potentiel. Les électrons se déplacent radialement vers les parois de la cavité, mais subissant l'action d'un champ magnétique parallèle à l'axe de la cavité, leur trajectoire devient spirale, produisant ainsi une onde électromagnétique.

(3) Des électrons, émis par un filament chaud, sont accélérés par une haute différence de potentiel et traversent une région avec un fort champ magnétique longitudinal. La trajectoire des électrons devient hélicoïdale et, en conséquence, ils émettent des ondes électromagnétiques qui sont amplifiées par la cavité résonante.

(4) Un flux constant d'électrons provenant d'un canon à électrons traverse une cavité résonante soumise à un signal de radiofréquence. Ce flux est alors modulé par l'interaction avec la cavité, puis arrive dans une deuxième cavité où il génère un signal de même fréquence mais amplifié. En réinjectant à l'entrée une partie du signal de sortie, on construit un oscillateur capable d'engendrer des ondes électromagnétiques.

(5) On fait passer un faisceau d'électrons relativistes dans un champ magnétique créé par une suite d'aimants dont les pôles sont orientés alternativement nord-sud, ce qui confère aux électrons un mouvement ondulatoire transversal, avec comme conséquence l'émission des photons monochromatiques dont la fréquence est réglée par la vitesse des électrons ou la valeur du champ magnétique, et qui sont rendus cohérents par confinement dans une cavité.

(6) Il s'agit de dispositifs semi-conducteurs avec des jonctions particulières, qui présentent des résistances négatives dans leur caractéristique intensité/tension, ce qui les rend utilisables dans les oscillateurs de haute fréquence.

(7) Ce sont des transistors à effet de champ, avec des hétérojonctions de construction particulière, dont les électrons forment un gaz électronique à une des interfaces et assurent ainsi le transport de charges avec une grande mobilité, ce qui permet des fréquences de fonctionnement très élevées.

On peut augmenter leur fréquence d'émission jusqu'à la région THz, mais leurs performances en termes de puissance et d'efficacité diminuent au fur et à mesure que la fréquence augmente. Dans le même registre, on peut tirer parti de la non-linéarité de ces dispositifs pour générer des harmoniques dont les fréquences atteignent le domaine du THz, cela demande néanmoins de disposer de sources de pompage de grande puissance et ne permet de délivrer généralement que des puissances de sortie plutôt faibles.

Deuxièmement, on peut faire appel à des technologies optiques. Mais cette fois-ci, on essaie de diminuer la fréquence pour atteindre le domaine des ondes THz, grâce à des dispositifs comme les lasers cascade quantique, ou à divers dispositifs à base d'optique non linéaire, de rectification optique, de mélange en cavité ou d'antennes photoconductrices.

Initialement développés pour émettre dans l'infrarouge, les lasers à cascade quantique sont des lasers à semi-conducteurs, dont les fréquences d'émission ont pu être baissées pour arriver à quelques THz. Ils sont très compacts, peuvent être accordés sur une plage limitée, mais nécessitent un système de refroidissement cryogénique. Un grand effort de recherche est actuellement développé pour rendre ces composants fonctionnels à des températures moins basses, atteignables grâce à des cryostats à base d'effet Peltier.

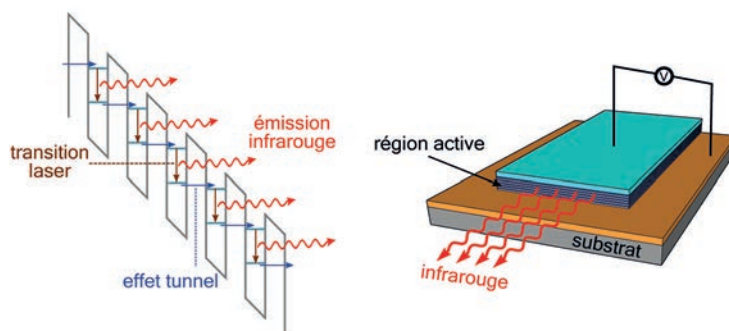


Figure 2 : Laser quantique à cascade. Il est formé par un empilement de couches semi-conductrices déposées par épitaxie, qui forment une succession de puits de potentiel séparés par des barrières de potentiel. Les électrons traversent ces barrières par effet tunnel, puis effectuent des transitions entre les deux niveaux d'énergie des puits quantiques, émettant ainsi du rayonnement, en général de l'infrarouge. De ces traversées et transitions successives vient l'appellation de laser à cascade – Source : réalisée par l'auteur.

Deux ondes optiques qui traversent un milieu non linéaire, par exemple un cristal, peuvent produire des battements par différence de fréquences, en particulier dans le domaine THz. En pratique, on utilise une impulsion laser ultra-courte, cette différence de fréquences se réalisant entre les diverses composantes de cette impulsion. Les sources THz basées sur cette technologie sont généralement beaucoup moins efficaces, l'énergie photonique du rayonnement THz étant bien inférieure à celle des faisceaux optiques. Il existe également un autre défi : les ondes THz produites sont divergentes, résultat de leur longueur d'onde relativement longue par rapport à la taille du milieu non linéaire.

On peut engendrer des ondes THz en faisant appel à une seule onde optique, par la méthode appelée « redressement optique ». On envoie dans certains gaz des impulsions femto-secondes, ce qui engendre des ondes THz. Dans ce cas, un plasma est généré par la superposition d'un faisceau infrarouge avec son deuxième harmonique. Pour une bonne efficacité de conversion, un contrôle de phase soigneux des ondes impliquées est nécessaire. Par rapport au redressement optique dans les cristaux, la largeur de la bande d'émission est généralement plus grande permettant d'obtenir des énergies d'impulsion plus élevées.

Les antennes photoconductrices peuvent fonctionner à la fois comme source et comme détecteur d'ondes THz. Elles se composent de deux bandes métalliques parallèles légèrement espacées, déposées sur un matériau semi-conducteur dont les porteurs de charge ont à la fois une courte durée de vie et une haute mobilité, comme le GaAs. On applique alors une tension de polarisation sur ces deux bandes métalliques et l'on envoie un bref *pulse* laser focalisé sur la zone située entre ces deux bandes, ce qui provoque un bref court-circuit. La variation du potentiel induit des oscillations rapides dans l'antenne, en particulier des ondes THz, sur une large bande de fréquences et de grands angles d'émission.

Les antennes photoconductrices peuvent également fonctionner en mode continu. On les éclaire par deux lasers mono-fréquence, ce qui module la conductivité du semi-conducteur avec une fréquence de battement égale à la différence de fréquences des deux lasers. Le potentiel électrique se trouve ainsi modulé, ce qui engendre des ondes THz de fréquence déterminée et accordable dans certaines plages de valeurs.

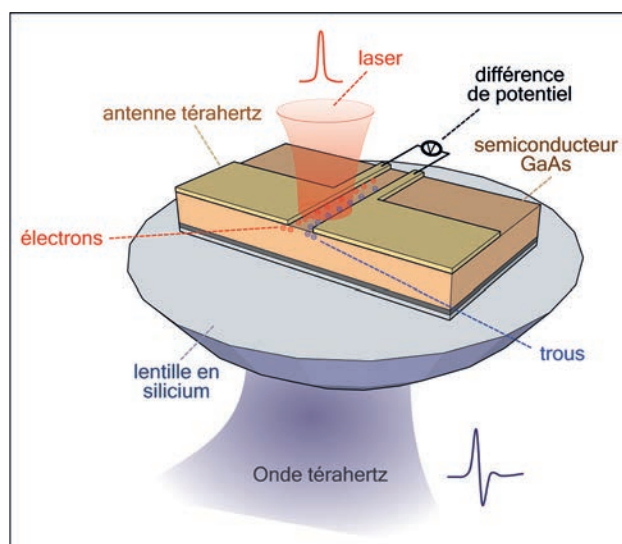


Figure 3 : Antenne photoconductrice. On éclaire avec un bref pulse laser le semi-conducteur, ce qui engendre des paires électrons-trous et provoque un bref court-circuit entre les deux bandes métalliques de l'antenne. Cette oscillation rapide du potentiel provoque une onde THz qui sera ensuite focalisée à l'aide d'une lentille en silicium – Source : réalisée par l'auteur.

Détecteurs

Un système THz doit être capable non seulement de produire, mais aussi de détecter et de mesurer ce rayonne-

ment. Plusieurs technologies de détecteurs sont en cours de développement, parmi lesquelles les diodes Schottky, les antennes photoconductrices, des détecteurs non linéaires ou de phase optique et des bolomètres.

La diode Schottky est une jonction métal semi-conducteur⁽⁸⁾. Sa vitesse de commutation est élevée et sa tension directe est faible, ce qui a permis de multiplier les applications dans la détection des signaux de haute fréquence. Étant des composants non linéaires, les diodes Schottky sont aussi utilisées comme mélangeurs dans la détection par battement de fréquences (hétérodyne).

Les antennes photoconductrices, citées auparavant comme sources THz, peuvent également fonctionner comme des détecteurs. Mais, dans ce cas, c'est l'onde THz qui engendre la tension aux bornes de l'antenne, ce qui génère un courant électrique qui est ensuite amplifié et mesuré. Comme la durée de vie des porteurs est courte, la détection du signal n'a lieu que pour des laps de temps courts. Un des défis technologiques actuels est de baisser le coût de fabrication de ces antennes en remplaçant l'épitaixie à jet moléculaire par le dépôt chimique en phase vapeur, procédé plus adapté à une production de masse.

Lorsqu'une onde THz et un rayonnement laser traversent un matériau non linéaire, ils peuvent interagir l'un avec l'autre, ce qui a pour conséquence une modification de la fréquence du laser (une addition ou une soustraction de fréquence avec l'onde THz), qui peut être détectée par des méthodes d'interférométrie.

Les bolomètres sont des détecteurs thermiques. Ils détectent le rayonnement électromagnétique par la chaleur générée lors de l'absorption. Ce principe s'applique également aux ondes THz, il faut cependant se rappeler que la conversion en chaleur ne mesure que l'énergie des impulsions et ne permet pas de disposer d'informations sur les longueurs d'onde ou les phases. Le bolomètre est par définition un dispositif de détection incohérent.

Dans certains cas particuliers, le dispositif THz peut être à la fois source et détecteur. Cela arrive quand l'onde sortante d'un laser traverse l'échantillon à mesurer, puis est réinjectée dans la cavité du laser, ce qui a pour résultat une modification du fonctionnement du laser laquelle peut se traduire par un signal mesurable. Un tel dispositif a été mis au point récemment, sur la base d'un laser à cascade pulsé.

Systèmes

Une méthode classique de spectroscopie est d'envoyer l'onde THz produite par la source à travers l'échantillon à mesurer, puis d'analyser l'amplitude de l'onde sortante à l'aide d'un détecteur.

Une technique plus élaborée est la spectroscopie dans le domaine temporel THz, où l'émetteur et le récepteur THz

(8) Les porteurs majoritaires du semi-conducteur sont injectés rapidement dans la bande de conduction du métal et deviennent ainsi des électrons libres. L'absence de recombinaison dans la région de barrière (à la différence de la jonction pn de diode classique) confère aux diodes Schottky des temps de commutation très brefs.

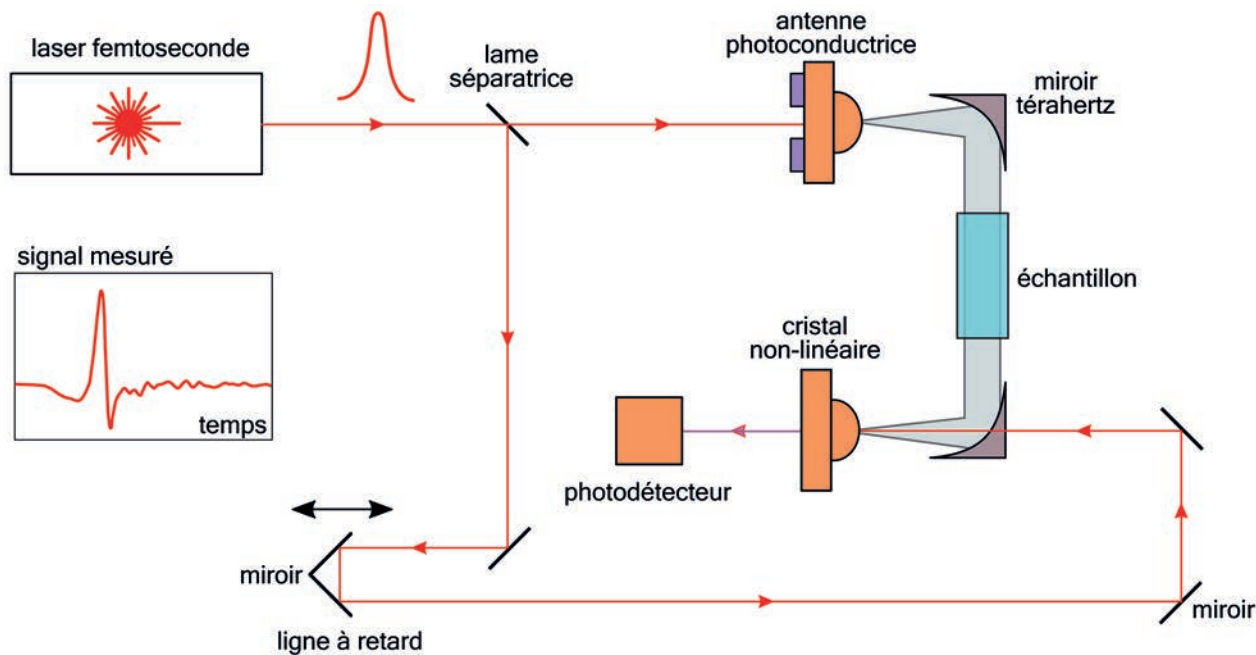


Figure 4 : Spectroscopie dans le domaine temporel. Un pulse laser ultra-court est envoyé sur une antenne photoconductrice, ce qui engendre des ondes THz, et après être passé par une ligne à retard, il arrive sur un cristal non linéaire. L'onde THz traverse l'échantillon, puis arrive sur le cristal non linéaire générant une modification légère de la fréquence du rayon laser. Cette modification est mesurée par le photodétecteur. Le déplacement du miroir permet de régler le délai, ce qui permet de mesurer la phase du signal, en plus de son amplitude – Source : réalisée par l'auteur.

sont étroitement couplés. La même impulsion optique, émanant d'un laser ultrarapide qui produit des ondes THz au niveau de la source, est également envoyée au détecteur après être passée par une ligne à retard, qui lui confère un délai variable. On effectue alors des mesures répétées à des délais différents. Ce système constitue une sonde à impulsions capable de mesurer non seulement des amplitudes mais également la phase de l'onde, ce qui donne des informations supplémentaires sur la nature des matériaux analysés.

Les applications industrielles des ondes THz

Les ondes THz ont été, dans un premier temps, utilisées en astrophysique ⁽⁹⁾. Elles permettent d'identifier de manière précise des molécules présentes dans l'espace, à travers leurs signatures spectroscopiques spécifiques qui se situent dans la bande de fréquences correspondant à ces ondes. Plus récemment, la spectroscopie THz a permis de mettre en évidence dans les nuages interstellaires des molécules organiques complexes liées à l'apparition de la vie.

Les propriétés remarquables de ces ondes (faible énergie photonique, forte absorption dans l'eau, fréquences correspondant aux signatures spectrales de nombreuses substances) les rendent particulièrement appropriées pour

de nombreuses applications industrielles, qui ont récemment commencé à se multiplier.

Biomédical

Faisant partie des rayonnements non ionisants, les ondes THz sont moins nocives pour les tissus vivants que les rayons X, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'imagerie médicale, en particulier à la détection du cancer de la peau ou du sein, au repérage des caries dentaires, à l'évaluation de la gravité des plaies et des brûlures ⁽¹⁰⁾. Et ce d'autant plus que les ondes THz peuvent traverser les milieux diélectriques non conducteurs, comme les pansements médicaux.

Industrie

De nombreuses substances chimiques ont des signatures spectrales caractéristiques de la bande de fréquences THz. On peut alors utiliser les ondes THz pour détecter et identifier une contamination indésirable lors de la production de substances chimiques dans l'industrie pharmaceutique, ou dans l'industrie agroalimentaire pour vérifier la fraîcheur des aliments.

L'absorption des ondes THz par les molécules d'eau peut être mise en œuvre pour déterminer en temps réel la quantité d'eau dans les huiles lubrifiantes, qui représente un facteur important d'usure des pièces mécaniques.

La plupart des matériaux polymères sont transparents au rayonnement THz. Il est alors possible d'examiner la qualité des pièces en plastique extrudées ou collées dans

(9) Sur une grande partie du spectre THz, la longueur d'onde du rayonnement est inférieure au millimètre. C'est la raison pour laquelle on les appelle dans les applications astrophysiques les ondes submillimétriques.

(10) Les ondes THz sont fortement absorbées par l'eau, ce qui limite l'emploi de l'imagerie THz à l'exploration des tissus situés près de la surface du corps, ou pauvres en eau, comme les tissus adipeux.

divers produits de l'industrie du plastique ; les mêmes applications sont possibles dans l'industrie du papier.

Afin d'obtenir un recyclage de qualité, il est nécessaire de trier et séparer les différents types de plastiques collectés. Les ondes THz peuvent améliorer l'équipement de tri optique actuellement utilisé pour mieux identifier les différents types de résines plastiques présents dans les déchets.

Contrôle non destructif

L'imagerie THz peut servir dans le contrôle de la qualité des produits en matériaux composites, par exemple pour évaluer l'intégrité structurelle des éoliennes en identifiant dans des échantillons de polypropylène ou d'autres matériaux les zones présentant des teneurs en fibres différentes.

De même, les composites à base de polymères de bois, sensibles à l'absorption d'eau, peuvent être examinés par spectroscopie THz afin de surveiller leur teneur en eau. Suivant le même principe, on peut évaluer l'humidité ou l'épaisseur du papier, en mesurant l'atténuation de l'onde THz qui le traverse.

Un emballage en carton ou en plastique est transparent vis-à-vis des ondes THz, ce qui permet dans le domaine du conditionnement des produits de détecter les articles défectueux et les objets étrangers, et de vérifier après transport que le produit emballé n'a pas été endommagé.

Dans le même registre, les ondes THz peuvent permettre de détecter, avec une résolution inférieure à 1 mm, des contaminants potentiellement dangereux dans les aliments : morceaux de plastique, bois, verre, pierre ou métal.

L'inspection des infrastructures vieillissantes comme les oléoducs ou les gazoducs peut être réalisée à l'aide des ondes THz, qui sont capables de détecter les taches de corrosion situées à la surface de pipelines recouverts de matériaux isolants de divers types, comme la laine minérale ou la mousse d'uréthane.

L'imagerie THz à grande surface a déjà été utilisée pour identifier d'éventuels défauts présentés par le réservoir externe de la navette spatiale, les ondes THz étant capables de traverser le revêtement de mousse qui couvre le réservoir sur une profondeur de 20 cm.

Enfin, les ondes THz peuvent également être utilisées dans l'analyse matérielle et la conservation d'œuvres d'art (peintures, manuscrits, trouvailles archéologiques).

Télécommunications

Les fréquences élevées des ondes THz les rendent particulièrement appropriées pour le déploiement de systèmes de télécommunications de très haut débit et à faible latence. Ces bandes de fréquences n'ont d'ailleurs pas encore été attribuées. Cependant, la forte atténuation des ondes THz dans l'atmosphère, due à la présence de vapeur d'eau et de l'oxygène, les rendent peu adaptées pour les télécommunications à longue distance. Les applications visées sont plutôt celles se rattachant aux réseaux de très haut débit et de courte portée à l'intérieur des bâtiments, notamment celles nécessaires au déploiement de la 6G ou de l'Internet des objets.

Agriculture

La forte absorption dans l'eau des ondes THz les rend particulièrement appropriées comme outils de mesure et de surveillance de la teneur en eau des tissus végétatifs, avec des applications dans le domaine du *monitoring* de l'irrigation des cultures.

Défense et sécurité

L'imagerie THz est déjà utilisée dans les aéroports pour les contrôles de sécurité visant à détecter la présence d'armes dissimulées ; elle constitue une alternative aux systèmes à micro-ondes ou à rayons X.

La spectroscopie THz peut également être utilisée pour la détection de matières explosives, en particulier des explosifs de fabrication artisanale, ou encore pour la détection des substances chimiques illicites.

La forte atténuation des ondes THz lors de leur propagation à l'air libre, due à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère, réduit leur portée à des valeurs étant de l'ordre du kilomètre. Néanmoins, cette courte portée peut constituer un atout en rendant plus difficile l'interception par l'ennemi des communications confidentielles échangées entre les diverses unités armées, en particulier entre les navires de guerre.

Leur marché

Le marché des technologies THz se divise en quatre domaines : les sources d'ondes THz, les détecteurs, les systèmes et les composants. Son volume annuel mondial est actuellement de 450 millions d'euros ; il devrait dépasser les 2 milliards d'euros en 2027, avec un taux de croissance de 25 % par an⁽¹¹⁾.

Il est dominé par plusieurs entreprises :

- Menlo Systems, un *spin-off* de l'Institut Max Planck, qui fabrique de nombreux produits depuis les antennes et composants THz jusqu'aux systèmes complets de spectroscopie THz.
- TeraView, un *spin-off* de l'Université de Cambridge, qui produit des équipements d'imagerie et de spectroscopie THz pour la mesure et l'analyse des couches de peinture, des matériaux composites, des circuits intégrés ou des médicaments.
- Microtech Instruments (aux États-Unis), qui fabrique des instruments de mesure pour les applications d'imagerie et de spectroscopie ultra-rapides au laser, Raman, multi-photons et THz.
- Advantest (Japon), qui fabrique des équipements de test automatique pour l'industrie des semi-conducteurs et des instruments de mesure destinés à être intégrés dans des systèmes électroniques, à base de fibre optique ou recourant aux communications sans fil ; certains d'entre eux font appel à des technologies THz.

Parmi les acteurs THz, figurent également les sociétés Advanced Photonix, Traycer, Terasense et Insight Product

(11) Industry Research, Rapport "Global Terahertz (THz) Technology Market Size, Status and Forecast 2021-2027".

aux États-Unis, Digital Barriers et QMC Instruments au Royaume-Uni, Gentec Electro-Optics au Canada et Toptica Photonics en Allemagne.

Les grands groupes industriels détiennent 36 % des parts de marché et sont actifs sur toute la chaîne de valeur de la filière THz, les entreprises de taille intermédiaire en détiennent, quant à elles, 37 % et les PME 27 %, ces dernières focalisant leur effort de R&D sur les sources et les détecteurs.

En Europe, le marché est orienté vers le secteur des systèmes THz et a pour cible la détection des objets et des défauts sur de grandes surfaces, la mesure des épaisseurs et la caractérisation chimique et structurale de petits objets et défauts sur de petites surfaces ou volumes.

La R&D THz en France

Il existe en France une tradition de recherche dans le domaine des ondes millimétriques et THz, liée au développement des applications en télécommunications de l'industrie de la Défense.

Un groupement de recherche, NanoTeraMir, fédère environ 28 laboratoires et 7 entreprises dans le domaine des fréquences THz et infrarouges moyens, mais aussi dans celui des nanosciences et des nanotechnologies. Parmi les entreprises participantes à ce groupement, peuvent être citées : III-VLab (opto et microélectronique), Thales (Défense), Lynred (détecteurs infrarouge), Nethis (contrôle non destructif), Minatec (micro et nanotechnologies), Kapteos (mesures électromagnétiques), Terakalis (détecteurs, systèmes) ou encore Mirsense (lasers à cascade quantique).

Plusieurs *start-ups* ont été créées, que nous avons déjà citées pour certaines : Lytid (sources THz), Teratonics (détecteurs, systèmes), Selenoptics (composants et fibres optiques) ou Terakalis (détecteurs, systèmes).

Il faut également souligner la mise en place récente d'une chaire industrielle Thales-ENS afin d'accélérer le développement des détecteurs pour les communications THz.

Cependant, ce domaine est dominé en Europe, par l'Allemagne. Dans l'initiative européenne Teraflag, qui fait intervenir une centaine d'universités et organismes de recherche, 17 sont allemands, 18 britanniques et 10 français. Sur les 41 PME participantes, 11 sont allemandes et seulement 2 sont françaises. Enfin, sur les 20 grands groupes, 11 sont allemands et 2 français.

Conclusion

Les ondes THz sont un domaine d'avenir avec un fort potentiel d'applications industrielles et un marché en plein développement. Il subsiste cependant plusieurs obstacles technologiques à franchir. Des progrès restent à faire en termes de performance des dispositifs et de coût de fabrication, afin de permettre une industrialisation à grande échelle.

Bibliographie

- DHILLON S. S. *et al.* (2017), "The 2017 terahertz science and technology roadmap", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50.
- CHATTOPADHYAY G. (2011), "Technology, Capabilities, and Performance of Low Power Terahertz Sources", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 1.
- LEWIS R. A. (2019), "A review of terahertz detectors", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52.
- GARBACZ P. (2016), "Terahertz Imaging – Principles, Techniques, Benefits and Limitations", *Problemy Eksploatacji* 100.
- WIETZKE S. *et al.* (2009), "Industrial applications of THz systems", *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 7385.