

Pas de pudeur avec les rayons T !

Opaques à la lumière ordinaire, beaucoup de matériaux sont transparents au rayonnement térahertz : la vision à travers les vêtements ou des cloisons n'est plus une utopie.

Les rayons X chers aux radiologues ont désormais un sérieux concurrent : les ondes térahertz, aussi nommées rayons T. Ces ondes électromagnétiques, entre les ondes radio et la lumière visible, permettent elles aussi de voir à travers la matière. Connues depuis plus d'un siècle, elles avaient été délaissées en raison de difficultés techniques qui paraissaient insurmontables. Cependant, des progrès récents, liés notamment aux techniques de microfabrication, augurent d'un avenir... radieux !

Pourquoi la production et la détection des ondes térahertz sont-elles un défi ? Au premier abord, ces rayons n'ont rien de particulier. Comme les rayons X, la lumière visible ou les micro-ondes, il s'agit d'ondes électromagnétiques, composées d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent de concert et s'induisent l'un l'autre tout en se propageant à la vitesse de la lumière. Les ondes térahertz se distinguent par leur gamme de fréquences, située entre celles des ondes radio et celle de la lumière infrarouge : entre 0,3 et 10 térahertz, un

térahertz valant 10^{12} hertz (1 000 gigahertz). Cela correspond à des longueurs d'onde comprises entre 0,03 et 1 millimètre.

Le moyen de détecter des ondes électromagnétiques dépend beaucoup de leur fréquence. Pourrait-on détecter les ondes térahertz à l'aide d'une antenne, comme les ondes radio ? Pour être efficace, une antenne doit être de taille comparable à la longueur d'onde des ondes détectées, quelques centimètres par exemple pour les ondes utilisées par les téléphones portables. De surcroît, le circuit électronique qui traite le courant électrique induit par l'onde dans l'antenne doit fonctionner à la fréquence de l'onde. Dans le cas des rayons T, réaliser des antennes de taille inférieure au millimètre pour les connecter à un circuit électronique fonctionnant à des fréquences supérieures à 0,3 térahertz relève encore de la (science-) fiction !

Entre radio et infrarouge

Tournons-nous vers l'optique. Les caméras sensibles à la lumière visible ou à l'infrarouge détectent l'arrivée des photons, ces particules qui portent l'énergie lumineuse. À son arrivée sur le capteur, chaque photon libère un électron qui est recueilli et qui participe à la formation de l'image numérique. Or l'énergie – inférieure au dixième d'électronvolt – des photons de la lumière térahertz est insuffisante pour provoquer des transitions électroniques dans la matière : ces photons sont capables tout au plus de faire vibrer ou tourner certaines molécules. Ainsi, ne pouvant être détecté ni comme une onde radio ni comme une particule de lumière, le rayonnement térahertz est resté inutilisé jusqu'à très récemment.

Ces ondes ont pourtant beaucoup d'intérêt. Comme nous venons de l'évoquer, les photons térahertz ont une énergie faible : ils interagissent peu avec la matière et sont donc très peu absorbés. Ils peuvent la traverser, comme le font les ondes radio. Ainsi, des matériaux aussi divers que les tissus, les plastiques, les céramiques et la brique sont transparents aux rayons T. En fait, seuls les métaux et l'eau bloquent le rayonnement térahertz. Et encore, ce rayonnement traverse le brouillard et peut pénétrer sur quelques millimètres les tissus biologiques.

Par ailleurs, au contraire des ondes radio, les rayons T sont peu diffractés à notre échelle. Les ondes ne divergent pas lorsqu'elles passent à travers une ouverture de grande dimension par rapport à la longueur d'onde. Celle-ci étant



Dessins de Bruno Vacaro

1. Les ondes térahertz ne sont bloquées que par l'eau et les métaux. Les tissus biologiques, qui contiennent de l'eau, sont donc relativement opaques à ce rayonnement. Une caméra sensible aux ondes térahertz peut ainsi former l'image d'un animal enfermé dans un paquet. Un nouveau moyen de lutter contre le commerce des espèces protégées ?



2. Le rayonnement térahertz ambiant, sans « éclairage » artificiel par un appareil émettant des rayons T, est suffisant pour obtenir des images utiles. Les applications aux services de sécurité

sont évidentes, comme l'illustrent les deux clichés incorporés au dessin. Ces clichés (à gauche en lumière normale, à droite en imagerie térahertz) ont été réalisés par la Société britannique *QinetiQ*.

inférieure au millimètre, les objets de taille courante perturbent peu les ondes térahertz. Les rayons T ont donc une propagation rectiligne, comme la lumière. On peut les focaliser avec des lentilles, et ainsi former des images.

Pénétrants, mais inoffensifs

Malgré tous ces avantages, l'essor des techniques térahertz est récent – il a fallu diminuer des coûts exorbitants et résoudre maints problèmes techniques. Les ondes térahertz étant mi-radio, mi-lumière, on a réalisé des caméras à rayons T en combinant les techniques de ces deux domaines.

À son arrivée sur l'objectif de la caméra, la « lumière » térahertz rencontre une lentille, en matériau polymère, qui forme une image sur un plan situé derrière elle. Des guides d'onde – sortes de microcavités – y capturent les rayons T et les acheminent vers un réseau d'antennes de quelques dizaines de micromètres de long, gravées sur une pellicule d'or. Cette dernière est déposée sur un matériau sensible à la chaleur tel que le bismuth. Les antennes, qui captent très efficacement le rayonnement térahertz, ne sont reliées à aucun circuit électronique. Le courant électrique induit par l'onde chauffe l'antenne et son support par effet Joule, comme dans une résistance. L'élévation de température est détectée et transformée en image comme dans une caméra infrarouge.

Une telle caméra est assez sensible pour fonctionner sur un mode passif, c'est-à-dire sans nécessiter un éclairage de la scène avec une source d'ondes térahertz. Les matériaux

transparents aux ondes térahertz, tels les tissus secs, sont invisibles sur les images obtenues. En revanche, les matériaux opaques à ces rayons réfléchissent le rayonnement térahertz ambiant et en émettent eux-mêmes : ils sont donc détectés par la caméra. Autrement dit, la caméra térahertz voit le corps à travers les vêtements. Gare aux voyeurs !

Parallèlement au développement de détecteurs, on a produit des sources intenses de rayonnement térahertz en accélérant des électrons, soit avec des accélérateurs de particules, soit avec des nanotransistors. Ces sources ouvrent la voie à d'intéressantes applications en radiologie. En effet, comme les photons térahertz sont beaucoup moins énergétiques que les photons X, les rayons T ne sont pas ionisants et ne présentent pas les dangers des rayons X. On peut utiliser ces nouvelles sources pour illuminer des objets et les regarder en transparence : on obtient alors des images, semblables aux radiographies, où les matériaux apparaissent d'autant plus noirs qu'ils sont opaques aux rayons T. Il est ainsi possible de compter le nombre d'allumettes dans une boîte sans l'ouvrir, de visualiser le contenu d'un pli suspect ou d'obtenir une vue tridimensionnelle d'une dent cariée. Bientôt, de l'homme, seul subsistera l'esprit dans son irréductible opacité.

J. M. CHAMBERLAIN, *Where optics meets electronics : recent progress in decreasing the terahertz gap*, in *Philosophical Transactions : Math., Phys. & Eng. Sciences*, vol. 362, n° 1815, pp. 199-213 (15), 2004.

P. H. SIEGEL, *Terahertz technology*, in *IEEE Trans. on Microwave Technology and Techniques*, vol. 50, pp. 910-928, 2002.