

Les ondes térahertz : techniques optoélectroniques temporelles

par Jean-Louis COUTAZ, Lionel DUVILLARET, Frédéric GARET
Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation, Université de Savoie,
 et Jean-Pierre GEX, *CCST-CRITT Ile de France*

De nouvelles sources, détecteurs, méthodes expérimentales sont disponibles dans le domaine des ondes térahertz, qui incitent à rechercher de nouvelles applications.

1. Avant-propos

On a vu apparaître récemment dans la littérature scientifique l'expression mystérieuse d'ondes T ou T-waves. Il ne s'agit pas d'un nouveau phénomène ésotérique, mais tout simplement d'ondes électromagnétiques dont la fréquence se situe autour du TéraHertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). Ce domaine de fréquences du spectre électromagnétique correspond à l'infrarouge lointain des opticiens ou au domaine millimétrique ou sub-millimétrique des électroniciens (voir figure 1). Pourquoi suscite-t-il de nombreuses recherches aujourd'hui alors que l'infrarouge lointain et les ondes millimétriques sont connus et étudiés depuis longtemps ?

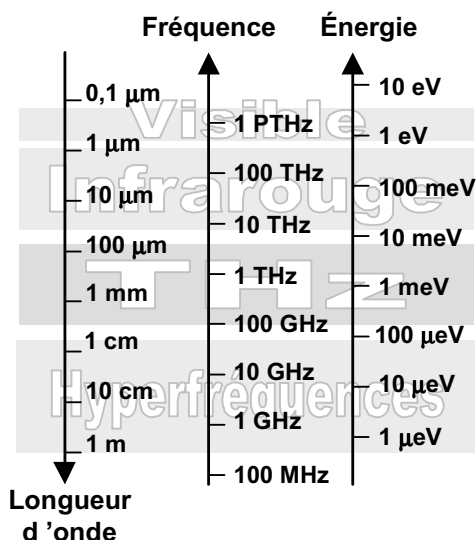


Figure 1 : Spectre électromagnétique

Plusieurs raisons expliquent cet engouement actuel. Tout d'abord, de nouvelles sources, détecteurs et techniques expérimentales sont disponibles depuis quelques années. Plusieurs méthodes sont en com-

pétition : méthodes optoélectroniques temporelles, battement de fréquences optiques, mélangeurs supraconducteurs ou à puits quantiques, etc. Nous nous intéresserons ici aux méthodes optoélectroniques temporelles, car elles sont sans doute les plus abouties en terme de système complet (émission et détection). L'idée de base consiste à transformer une impulsion optique ultra brève (sub-picoseconde) en une impulsion électrique elle-même très brève (de l'ordre de la picoseconde). L'impulsion électrique est rayonnée au moyen d'une antenne. Ce rayonnement éclaire un détecteur qui est déclenché par une partie de l'impulsion optique ayant servi à l'émission, mais qui a été retardée au moyen d'une ligne à retard optique. Il est alors possible d'échantillonner le signal détecté, à condition d'utiliser les lasers femtosecondes actuels, qui délivrent des impulsions optiques répétitives à très haute fréquence de récurrence (typiquement 100 MHz). Le signal temporel ainsi obtenu a une durée de l'ordre de la picoseconde. Une transformée de Fourier numérique donne son spectre, qui s'étend jusqu'au domaine THz. On parle alors d'ondes THz dans le domaine temporel. Ces méthodes ont été développées au cours des années 80 principalement par 3 groupes américains (G. Mourou à Rochester puis à Michigan, D. Auston à Columbia et D. Grischkowsky à IBM).

Cette technique optoélectronique est très large bande, elle ne nécessite pas de réaliser des expériences à basse température et permet des enregistrements suffisamment rapides pour les besoins de l'imagerie. Elle se présente ainsi comme une alternative très compétitive aux méthodes classiques de l'infrarouge lointain, qui mettent en jeu des temps d'enregistrement longs (spectroscopie en transformée de Fourier), ou des appareils au fonctionnement délicat et monochromatique (lasers millimétriques) ou à bande passante plus limitée (analyseur de réseau). Notons que toute cette activité optoélectronique, basée sur l'échantillonnage et donc sur l'emploi de sources répétitives et stables, n'a pu se développer harmonieusement que depuis l'avènement des lasers femtosecondes à solide, principalement du type saphir dopé titane, qui sont des appareils commerciaux "presse-bouton" très fiables dont les performances sont remarquables.

Ainsi, disposant de systèmes expérimentaux simples, fiables et rapides, les chercheurs ont très rapidement pu réfléchir aux applications des ondes THz. Ces applications sont de trois ordres : étude fondamentale de la matière dans ce domaine de fréquences, caractérisation de matériaux pour l'électronique et l'instrumentation ultrarapide, analyse physico-chimique. Des applications propres à la technologie actuelle des ondes THz sont aussi développées.

Cet article est divisé en plusieurs paragraphes : le premier décrit les techniques de génération et de détection des ondes THz temporelles. Ensuite, nous présentons l'interaction entre ces ondes et la matière. Puis nous nous intéressons à l'application la plus immédiate de ces ondes, à savoir la spectroscopie THz dans le domaine temporel, qui permet de mesurer la constante diélectrique complexe d'un matériau. Enfin, nous indiquons quelles sont les applications et les développements prévus pour cette technologie.

2. Principe de la génération et de la détection d'ondes THz dans le domaine temporel

2.1. Le dipôle de Hertz revisité

Chacun sait, depuis les travaux de Hertz, qu'un dipôle électrique, dont le moment dipolaire varie, rayonne des ondes électromagnétiques. Le champ lointain est proportionnel à la dérivée temporelle du courant circulant dans le dipôle. On comprend que, lorsqu'une impulsion de courant ultracourte traverse le dipôle, le champ lointain soit intense. De plus, le spectre de ce champ est très étendu, puisque inversement proportionnel à la durée de l'impulsion électrique.

L'électronique permet de générer des impulsions de courant dont la durée descend difficilement en dessous de la vingtaine de picoseconde. Si quelques laboratoires arrivent à comprimer ces impulsions jusqu'à la picoseconde à l'aide de lignes de transmission non linéaires, il s'agit de travaux très exploratoires. L'optoélectronique apporte une solution élégante au problème. On utilise une impulsion laser ultra brève pour générer une impulsion électrique dont la durée est sub-picoseconde.

2.2. Dipôles de Hertz photoexcités

Il existe différentes manières pour réaliser un dipôle de Hertz photocommuté.

2.2.a Photocommutateurs à semi-conducteur

Un circuit électrique ouvert est déposé sur un substrat semi-conducteur isolant (figure 2). Ce circuit est polarisé par une source de tension extérieure. Le resserrement entre les rubans métalliques, que l'on distingue au centre de la figure 2, joue le rôle du dipôle, puisque ses dimensions sont très faibles et qu'il porte, en l'absence d'éclairement, des charges égales mais de signes opposés. Le circuit est fermé en éclairant, au niveau du resserrement, la partie nue du semi-conducteur à l'aide d'une impulsion laser. On génère ainsi des porteurs dans le semi-conducteur, rendant la partie éclairée conductrice. En utilisant un matériau semi-conducteur à forte mobilité et présentant de nombreux défauts (pièges à électrons), la durée de vie des porteurs est très courte et permet d'obtenir des impulsions de courant sub-picosecondes. Ce sont les sources d'ondes THz temporelles au rendement le plus élevé, et donc les plus employées actuellement. L'arséniure de gallium épitaxié à basse température (LT-GaAs) ou des couches de silicium irradié déposées sur saphir (RD-SOS) présentent des caractéristiques excellentes pour la fabrication des photocommutateurs : il est ainsi possible de générer des impulsions de tension de plusieurs volts dont la durée est de l'ordre de 0,5 picoseconde.

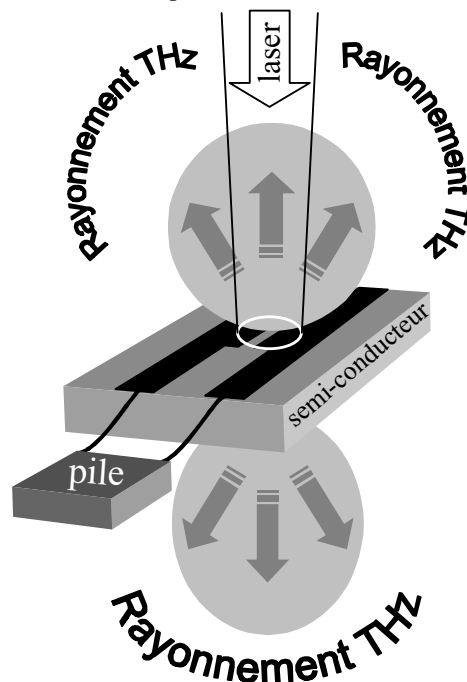


Figure 2 : Photocommutateur à semi-conducteur.

Actuellement, l'effort des recherches porte sur la réalisation de photocommutateurs de puissance, capables de commuter des kV en une picoseconde.

2.2.b. Effet d'accélération à la surface des semi-conducteurs

Cet effet conduit au plus simple des dispositifs. Les bandes de conduction et de valence s'incurvent au voisinage de la surface de semi-conducteurs. Il en résulte un champ électrique natif, normal à la surface et pénétrant dans le semi-conducteur sur une épaisseur inférieure au micron. Lorsqu'on éclaire le semi-conducteur, les porteurs photogénérés sont accélérés par ce champ. Ce courant photo-induit rayonne comme le dipôle de Hertz (figure 3). Malheureusement, puisque le dipôle est normal à la surface, il faut incliner le substrat semi-conducteur par rapport à la direction de propagation des ondes THz pour recueillir un signal dans cette direction. Cette géométrie n'est guère compatible avec l'utilisation des systèmes quasi-optiques de focalisation. Il est aussi possible de photogénérer des ondes THz en mettant en jeu des oscillations de Bloch dans des structures semi-conductrices confinées, de type puits quantique.

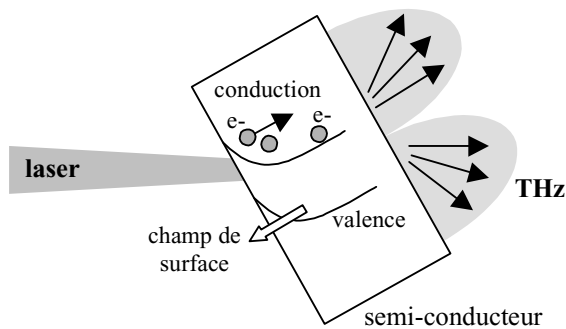


Figure 3 : Émission THz par accélération de porteurs à la surface d'un semi-conducteur

2.2.c. Redressement optique

Il s'agit d'un effet d'optique non linéaire d'ordre deux qui combine deux photons d'un faisceau optique intense dans un matériau. Le phénomène de ce type le plus connu est le doublement de fréquence optique, qui correspond à l'addition de l'énergie de deux photons. Ici, le phénomène correspond à la soustraction d'énergie. On obtient alors une polarisation statique et locale du matériau sous l'effet de l'éclairement. En employant une impulsion optique, cette polarisation ne dure que le temps de l'éclairement, car l'effet de redressement optique est pratiquement instantané. On peut générer ainsi un rayonnement THz dont la durée n'excède pas la vingtaine de femtoseconde, soit plus d'un ordre de grandeur en dessous des dispositifs à semi-conducteur. Les spectres associés s'étendent jusqu'à plusieurs dizaines de THz, mais ils présentent souvent des zones de moindres amplitudes liées à l'excitation de phonons optiques dans les cristaux non

linéaires. Le faible rendement de ces processus requiert de très fortes puissances optiques d'excitation.

2.3. Méthodes de détection

2.3.a. De la nécessité d'échantillonner

Les signaux électriques à détecter sont très courts et aucun détecteur n'est assez rapide pour mesurer directement leur forme temporelle. Il faut employer des techniques de corrélation entre le signal à mesurer et un signal de référence. Comme ces signaux sont répétitifs, on obtient la forme temporelle par échantillonnage (figure 4). Généralement, le signal THz sera corrélé avec une partie de l'impulsion laser ayant servi à le générer, qui est retardée au moyen d'une ligne à retard optique.

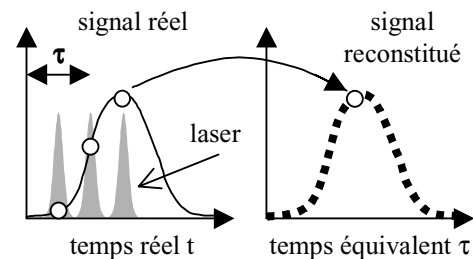


Figure 4 : Principe de l'échantillonnage

Il faut noter que quelques laboratoires ont présenté des systèmes interférométriques de type Michelson, où le faisceau THz est divisé suivant deux voies, dont une à longueur variable, puis recombinaison sur un détecteur.

2.3.b. Photocommutateurs

Les détecteurs à photocommutateur sont pratiquement identiques aux émetteurs de même type, sauf que le dispositif n'est pas polarisé par une source de tension, mais qu'il le sera par le champ électrique du signal THz incident. On commute le dispositif en l'éclairant avec une impulsion laser qui crée des porteurs dans le semi-conducteur.

Si une impulsion THz baigne en même temps le dispositif, les porteurs sont accélérés et ils donnent naissance à un courant électrique dans le circuit (figure 5). Ce courant est proportionnel à l'amplitude du champ THz à l'instant de l'éclairement. En l'absence d'impulsion THz, les porteurs se recombinent et aucun courant n'est induit. Ainsi, le signal obtenu est proportionnel au produit de convolution des impulsions THz et optique. Les qualités de ce type de détecteur sont au nombre de deux : leur extrême dynamique qui est

supérieure à 50 dB, leur sensibilité à l'amplitude du champ THz et non pas à son intensité.

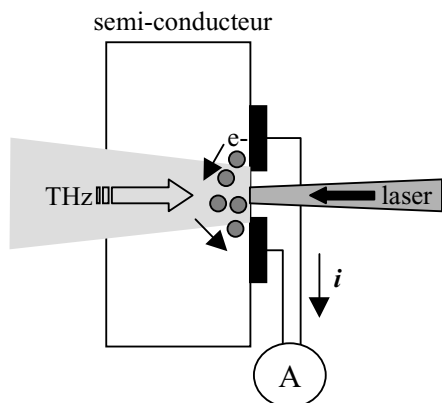


Figure 5 : Détection par photocommutation

2.3.c. Effet électro-optique

L'effet électro-optique, ou effet Pockels, traduit la variation de l'indice de réfraction d'un matériau sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Ici, ce champ sera celui du faisceau THz qui éclaire un cristal électro-optique. En choisissant bien le groupe et l'orientation cristallographique du matériau électro-optique, l'effet Pockels conduit simplement à la rotation de la polarisation d'un faisceau lumineux traversant le cristal. Cette rotation, proportionnelle à l'amplitude du champ THz, est mesurée à l'aide d'un montage classique mettant en jeu polariseur, analyseur et détecteur optique.

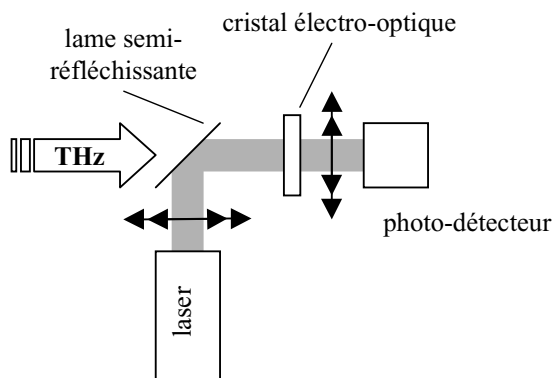


Figure 6 : Détection du signal THz par effet électro-optique.

L'avantage principal de ce mode de détection est sa bande passante extrêmement large, puisque l'effet électro-optique est pratiquement instantané. Malheureusement, sa sensibilité est très faible. Cependant, le groupe de X. Xhang au Rensselaer Institute a suffisamment développé cette technique pour l'appliquer à l'imagerie THz. Dans ce cas, le fais-

ceau THz et le faisceau laser ont une section étendue. Une optique permet de faire l'image du cristal électro-optique, et donc du champ THz, sur une caméra CCD qui joue le rôle de détecteur.

2.3.d. Bolomètres

Les bolomètres, très sensibles, sont utilisés lorsqu'il n'est pas utile de connaître la forme temporelle des impulsions, ou lorsqu'un schéma interférométrique est employé.

2.4. Schémas expérimentaux

Un schéma typique d'expérience de génération d'ondes THz et de mesure de la forme temporelle des impulsions rayonnées est présentée sur la figure 7. Un faisceau délivré par un laser impulsif est divisé pour alimenter la voie d'émission et la voie de lecture. Une ligne à retard optique permet de varier le décalage temporel entre émission et détection : ce sera l'élément clef de la technique d'échantillonnage mis en jeu. Une des deux voies est modulée à l'aide d'un hacheur, afin de pouvoir employer une technique de détection synchrone pour lire les signaux avec précision. Le faisceau THz émis, dont nous avons vu qu'il était du type dipolaire, nécessite un système quasi optique pour le mettre en forme et ainsi faciliter l'analyse des résultats. Généralement, on emploie un dôme hémisphérique au voisinage des dispositifs émetteur et récepteur. On complète ce système par deux miroirs paraboliques ou ellipsoïdaux afin de concentrer aussi les composantes basses fréquences (celles-ci ne sont que très peu focalisées par les dômes dont les dimensions sont de l'ordre ou inférieures aux longueurs d'ondes de ces composantes). Ainsi, au centre optique du système, le faisceau THz est pratiquement parallèle.

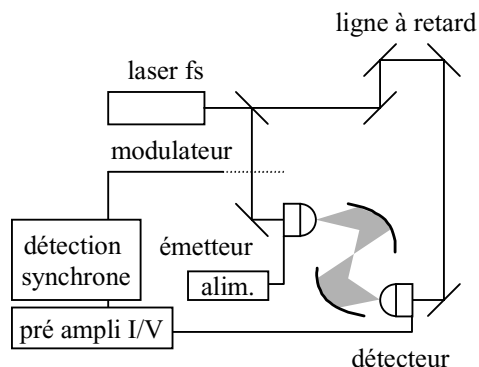


Figure 7 : Schéma de principe d'une expérience THz dans le domaine temporel

Les courants détectés sont généralement très faibles, typiquement compris entre quelques dixièmes de picoampères et quelques nanoampères. Aussi, l'électronique de détection est-elle à grand gain et à faible bruit. Associé à un amplificateur à détection synchrone, on emploie un préamplificateur courant tension à gain élevé.

Les études actuelles portent sur la mise au point de systèmes compacts, utilisant des lasers à fibre pompés par diode, et sur l'obtention de fortes puissances THz, pour le développement de l'imagerie ou des applications en environnement.

La figure 8 montre un signal temporel typique enregistré avec le banc expérimental de la figure 7. Ici émetteur et détecteur sont des photocommutateurs en LT-GaAs. La durée du signal est de l'ordre de la picoseconde.

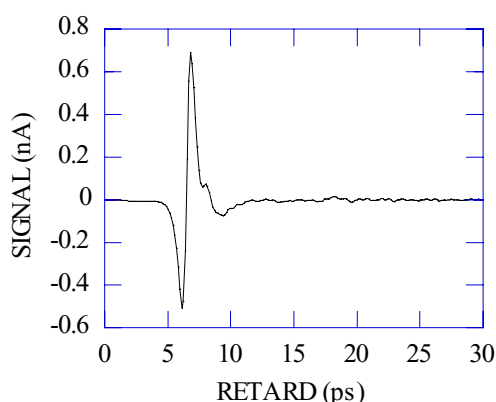


Figure 8 : Courant détecté dans une expérience THz dans le domaine temporel en fonction du retard entre émission et lecture.

Le spectre du signal temporel de la figure 8 est obtenu par transformée de Fourier : son module est représenté sur la figure 9. On remarque que le signal utile s'étend de 70 GHz jusqu'à 3 THz. En dessous de 70 GHz, le faisceau THz est mal focalisé par les optiques employées. En dessus de 3 THz, l'émetteur rayonne très peu d'énergie et le signal est plus faible que le bruit.

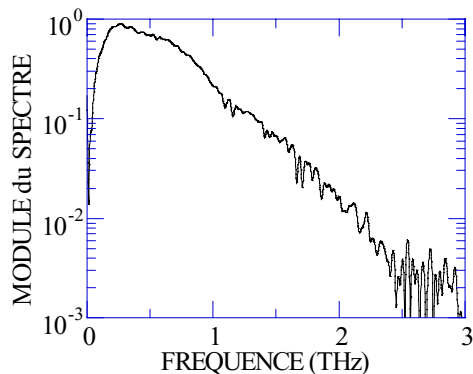


Figure 9 : Module du spectre associé au courant représenté sur la figure 8.

On notera la grande dynamique de l'expérience qui dépasse ici 50 dB. Les pics d'absorption, observés principalement au-dessus de 1 THz, sont dus à la vapeur d'eau présente dans le laboratoire, la mesure ayant été réalisée à l'air libre.

3. Spectroscopie THz dans le domaine temporel

La spectroscopie THz dans le domaine temporel permet la mesure de la constante diélectrique complexe d'un matériau, c'est à dire son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Deux possibilités d'études s'offrent alors : soit on veut connaître les paramètres d'un matériau pour des fins technologiques (électronique à très haute fréquence, radioastronomie...), soit il s'agit d'observer et d'analyser des phénomènes physiques au sein du matériau d'un point de vue fondamental. Dans les deux cas, il est utile de connaître les mécanismes de base de l'interaction entre une onde électromagnétique et la matière dans le domaine des fréquences THz.

3.1. Interaction THz-matière

De façon générale, l'interaction entre une onde électromagnétique et la matière peut se limiter au niveau corpusculaire (atomique ou moléculaire) ou au contraire mettre en jeu des phénomènes collectifs dans un matériau. Le domaine des fréquences THz correspond à des excitations peu énergétiques (voir figure 1) de l'ordre du meV.

Au niveau de l'atome, il s'agit de transitions entre niveaux électroniques très élevés, que l'on retrouve dans les atomes de Rydberg. Pour les molécules, on trouvera principalement les excitations de rotation, combinées avec des niveaux de vibration.

Dans la matière solide, les énergies des ondes THz correspondent à des vibrations du réseau cristallin (phonons) ou à des excitations électroniques (absorption par les porteurs libres, absorption par des impuretés, effets magnéto-optiques (effet Faraday, résonance cyclotron, résonance anti-ferromagnétique)). Notons que les porteurs libres, comme les électrons dans les métaux et dans les semi-conducteurs, ou bien au sein d'un plasma, réagissent facilement aux champs électriques des ondes THz et induisent une très forte absorption de ces ondes.

Enfin, citons les systèmes à puits quantiques dont la bande de conduction possède des niveaux discrets séparés par des énergies de l'ordre du meV, et les supraconducteurs, dont l'énergie de cohésion des

paires de Cooper se situe dans le domaine THz, la théorie BCS donnant pour l'énergie de cohésion E (en meV) $\approx 0,3 \cdot T_c$ (température critique en K).

3.2. Méthode de la spectroscopie THz dans le domaine temporel

Caractériser un matériau dans le domaine des ondes THz au moyen du banc expérimental décrit précédemment est aisé. Il suffit d'enregistrer le signal temporel transmis par un échantillon et le signal en l'absence d'échantillon (figure 10). On remarque que le signal transmis par l'échantillon est retardé et atténué par rapport à la référence. On observe aussi une seconde impulsion qui a effectué un aller-retour supplémentaire dans l'échantillon.

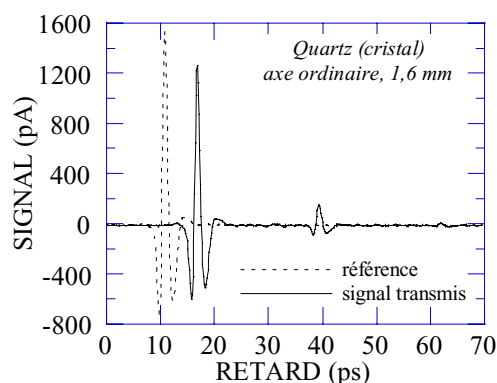


Figure 10 : Signal THz en l'absence (référence) et en présence d'une lame cristalline de quartz de 1,6 mm d'épaisseur.

Ensuite, on calcule la transformée de Fourier des deux signaux. Le rapport des deux transformées de Fourier donne le coefficient de transmission complexe de l'échantillon. En réalisant l'expérience dans une configuration simple (faisceau THz parallèle, échantillon homogène aux faces planes et parallèles), on peut en déduire, par résolution d'un problème inverse, l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption du matériau constituant l'échantillon.

Le lecteur peut se demander si cette procédure viole les lois de la physique, puisque, à partir d'une mesure, on détermine deux grandeurs. En fait, il n'en a rien. Les deux signaux temporels sont mesurés en conservant la même origine pour le temps équivalent. On connaît ainsi exactement l'amplitude et la phase de ces signaux. La transformée de Fourier transforme ces deux informations en parties réelle et imaginaire d'un nombre complexe (ici le coefficient de transmission). C'est à partir de cette valeur complexe qu'on détermine l'indice de réfraction complexe du matériau.

Notons enfin qu'il s'agit d'une spectroscopie sans spectroscope. C'est la transformée de Fourier numérique, associée à la ligne à retard et à la technique d'échantillonnage, qui joue le rôle du spectromètre. Cette méthode est très proche de la spectroscopie en transformée de Fourier, développée au cours des années 50, notamment en France par Jacquinot et les époux Connes. Mais, contrairement à cette spectroscopie qui travaille dans le domaine fréquentiel, la technique présentée ici est développée dans le domaine temporel.

3.3. Résultats typiques

Pour la plupart des matériaux, la détermination de l'indice de réfraction complexe, par spectroscopie THz dans le domaine temporel, ne demande que quelques minutes pour un spectre s'étendant depuis quelques dizaines de GHz jusqu'à plusieurs THz. On comprend que de nombreux matériaux aient pu être caractérisés de cette manière. Citons les cristaux diélectriques, les supraconducteurs, les semi-conducteurs, les plastiques, les gaz, les liquides, les flammes, les matériaux magnétiques, les matériaux à bande photonique interdite, les matériaux poreux... Pour l'indice de réfraction, la précision de la mesure est meilleure que le pour cent.

A titre d'exemple typique, voici la dispersion du Téflon entre 100 GHz et 2,5 THz (figure 11). La précision sur l'indice est environ $2 \cdot 10^{-5}$ ($\sim 0,1\%$) et elle est de l'ordre de 1 cm^{-1} pour le coefficient d'absorption. On remarque la très faible absorption du matériau, ainsi que la valeur pratiquement constante de son indice de réfraction dans cette gamme de fréquences. Pour obtenir cette courbe, mesure et calcul ont duré en tout quelques minutes.

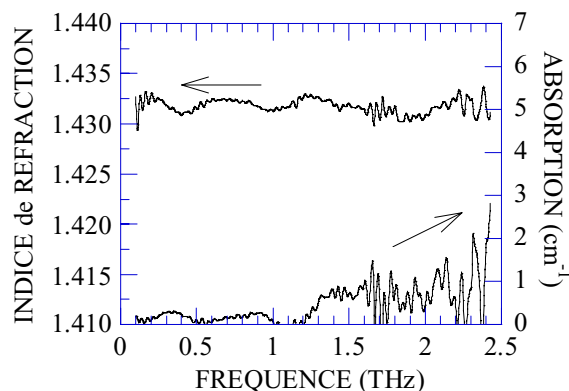


Figure 11 : Indice de réfraction et coefficient d'absorption du Téflon.

Le second exemple (figure 12) montre les valeurs obtenues pour un échantillon de silicium dopé p de résistivité $0,6 \Omega \text{ cm}$. Le comportement électromagnétique de cet échantillon est parfaitement modéli-

sé par celui d'un métal parfait (modèle de Drude en trait continu). La contribution des porteurs libres à la constante diélectrique est donc très importante.

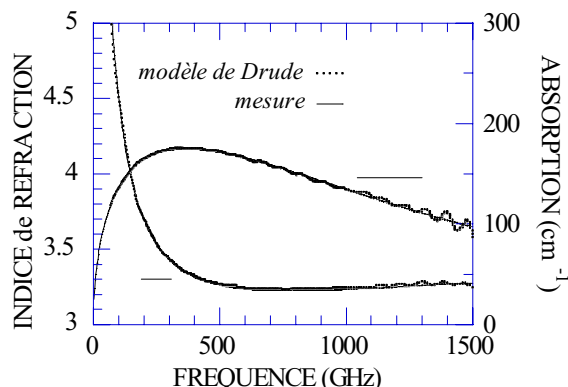


Figure 12 : Indice de réfraction et absorption du silicium dopé p ($\rho=0,6 \Omega \cdot \text{cm}$) dans le domaine THz.

L'exemple suivant est typique de ce que peut apporter la spectroscopie THz à l'étude des matériaux. L'échantillon étudié est un cristal à bande interdite photonique. Il consiste en un empilement régulier de baguettes de silicium de section carrée de $135 \times 135 \mu\text{m}^2$, séparées les unes des autres de $360 \mu\text{m}$. Il s'agit d'une structure de type tas de bois constitué de bûches empilées en couches croisées. La lumière qui se propage dans un tel milieu est fortement perturbée par la périodicité à 3 dimensions. L'équation d'Helmholtz qui régit cette propagation est mathématiquement très proche de l'équation de Schrödinger pour des électrons dans un cristal périodique. On retrouve alors le même type de solutions : en particulier, la notion de bande interdite pour les cristaux semi-conducteurs se traduit ici par une bande spectrale interdite pour la propagation de la lumière. Ce phénomène est observé sur la figure 13 où on note l'absence de signal transmis dans une bande centrée autour de 300 GHz.

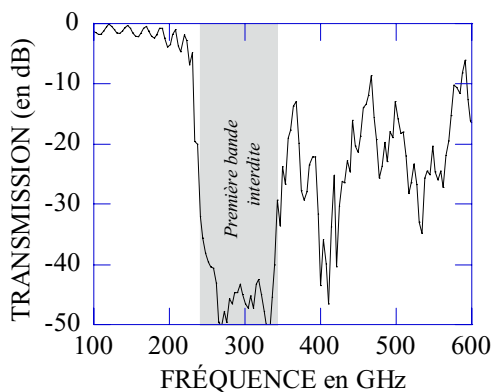


Figure 13 : Transmission d'un BIP en fonction de la fréquence.

3.4. Spectroscopie résolue dans le temps

Puisque les mesures sont réalisées dans le domaine temporel, il est possible d'observer des phénomènes dynamiques à l'aide des impulsions THz. Généralement, une partie du faisceau laser vient éclairer l'échantillon (on parle alors d'impulsions de pompe), tandis que l'autre partie de ce faisceau sert à générer les impulsions THz qui traverseront l'échantillon (impulsions de sonde). Ces expériences sont du type pompe optique-sonde THz, l'impulsion THz venant lire le phénomène induit par la pompe optique. En faisant varier l'intervalle de temps entre pompe et sonde (c'est la technique d'échantillonnage expliquée précédemment), on obtient la signature temporelle du phénomène étudié.

A titre d'exemple, la figure 14 présente la dépendance temporelle de la variation de transmission THz pour différents semi-conducteurs, après excitation des porteurs libres par une impulsion laser.

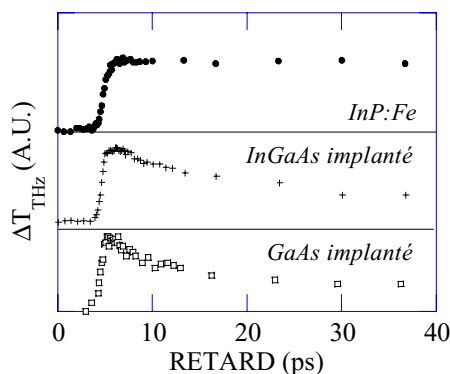


Figure 14 : Variation de la transmission THz de semi-conducteurs après une excitation optique.

Pour l'InP dopé Fe, on retrouve la valeur connue de la durée de vie des électrons dans la bande de conduction, qui est de l'ordre de 600 ps. Pour les matériaux implantés (InGaAs et GaAs), cette durée de vie est fortement réduite par la présence de centres de recombinaison.

4. Applications

4.1. Analyses physico-chimiques, environnement

Les ondes THz peuvent apporter une contribution indispensable dans le domaine de l'analyse physico-chimique, en particulier pour la détection d'espèces chimiques gazeuses. En effet, on a vu dans le paragraphe précédent que les molécules possèdent un

spectre rotationnel fourni dans l'infrarouge lointain, et qu'elles peuvent donc fortement absorber les ondes THz. Pour certaines molécules comme NH_3 , c'est pratiquement le seul moyen de détection.

Des systèmes de détection de polluants atmosphériques sont actuellement en cours de développement. Citons parmi ces études un spectromètre à filtre de gaz développé à l'université de Dunkerque qui permet de détecter un gaz sélectionné. Les premiers essais ont donné des résultats très prometteurs, puisque des niveaux de concentration aussi faibles que 10 ppm de gaz test (HCN) ont pu être détectés. Parmi les nombreuses études réalisées dans les laboratoires universitaires à travers le monde, notons l'analyse de gaz d'échappement de voiture, l'étude de combustion par l'analyse de flammes, la cinétique de réactions chimiques...

4.2. Imagerie THz

L'absorption différenciée des matériaux permet d'imager un objet inhomogène dans le domaine THz. Les zones métalliques, humides, etc., sont opaques aux ondes THz, tandis que les parties diélectriques sont généralement transparentes. Dans la plupart des travaux publiés sur ce sujet, l'image THz est obtenue simplement en mesurant l'amplitude de l'impulsion THz transmise. La figure 15, obtenue par **B. Hu et M. Nuss des laboratoires Bell**, montre ainsi le signal transmis par une feuille d'arbre qui a séché pendant 2 jours après ramassage. L'humidité résiduelle apparaît nettement en sombre au niveau des nervures de la feuille.

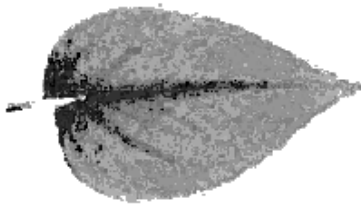


Figure 15 : Image THz d'une feuille enregistrée après deux jours de séchage.

4.3. Applications dans le domaine médical

De nombreux scientifiques espèrent pouvoir employer des ondes THz dans le domaine médical, car ces ondes faiblement énergétiques sont sans danger pour les tissus biologiques, à condition, bien entendu, que les puissances utilisées restent faibles. Les recherches actuelles portent sur

la détection de tissus cancéreux, ainsi que sur l'analyse de brûlures. Elles sont basées sur la teneur en eau des tissus qui modifie l'absorption des ondes THz. En contre partie, cette absorption très forte induite par la présence d'eau dans les tissus biologiques limite la pénétration des ondes THz à des profondeurs de l'ordre du millimètre dans les cas les plus favorables. Les études actuelles, en particulier sur la détection de tumeur, sont donc effectuées sur de fines tranches découpées avec des microtomes.

4.4. Echographie THz

Chaque interface entre deux milieux différents réfléchit une partie de l'amplitude d'une onde électromagnétique incidente, qui sera ici l'onde THz. Dans le domaine temporel, ces différentes ondes réfléchies ou transmises donneront des échos séparés dans le temps. En les analysant, on peut reconstruire la structure interne d'un échantillon. Bien entendu, il faut que l'échantillon soit globalement transparent aux ondes THz. Des études variées ont déjà été menées :

- Echographie d'objets divers : matériaux renforcés par des fibres, structures multicouches et même stylo Bic !
- Mise en évidence de bulles d'air dans des structures multicouches à base de mousse synthétique ;
- Détection d'objets dissimulés sous des textiles, comme des armes cachées sous des vêtements.

4.5. Télécommunications à très haut débit

Les télécommunications progressent rapidement vers des débits d'information de plus en plus élevés. Si le Gbit/s est devenu l'ordre de grandeur standard des télécommunications optiques, on parle de plusieurs dizaines de Gbit/s pour les télécommunications par satellite. L'avènement des technologies THz fait rêver les technologues qui imaginent dès à présent des débits de plusieurs centaines de Gbit/s. Des travaux préliminaires, portant sur la mise au point de composants, commencent à être publiés. Il s'agit surtout de composants opto-microondes à puits quantique qui réalisent le mélange entre ondes optique et THz. L'onde optique traversant le composant excite des porteurs vers la pseudo bande de conduction. Si une onde THz éclaire simultanément le composant, elle porte aussi les porteurs vers des niveaux inter sous-bande plus élevés et modifie l'absorption de l'onde optique. Ainsi, on obtient une modulation THz du faisceau lumineux. D'autres travaux portent sur l'effet de "spectral hole burning", c'est à dire sur la saturation d'un niveau élevé de la bande de conduction d'un semi-conducteur, pour réaliser le mélange des ondes.

4.6. Applications diverses

Voici quelques exemples, qui ne sauraient constituer une liste exhaustive, des applications étudiées actuellement en Europe, aux Etats-Unis ou au Japon :

- Cartographie du taux d'humidité et de la densité du bois ;
- Etude sur maquette des surfaces équivalentes radar d'avions ou de bateaux ; le facteur d'échelle ($\sim 1/100$) de la maquette correspond au rapport entre la longueur d'onde THz (quelques centaines de μm) et la longueur d'onde d'un radar réel (quelques cm). D. Grischkowsky (Université d'Arizona) a ainsi présenté il y a quelques années les échos THz comparés de maquettes d'avions F117A Stealth fighter (avion furtif) et de MiG 29 (figure 15) ;

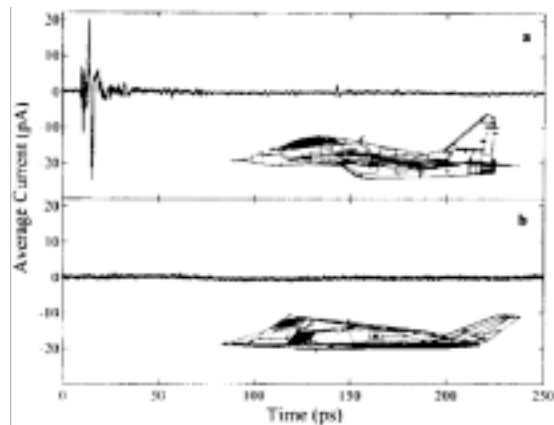


Figure 15 : Echo THz de maquettes d'avions de chasse à l'échelle 1/200 (en haut : MiG 29 ; en bas : avion furtif F117A Stealth fighter). On remarquera l'absence de signal réfléchi par l'avion furtif.

- Comptage de billets de banque par mesure de temps de vol des impulsions THz : plus il y a de billets à compter, plus l'impulsion THz met de temps pour les traverser. Les méthodes temporelles permettent une mesure aisée de ce temps de vol. Cette mesure est possible car le papier sec est particulièrement transparent aux ondes THz. Profitant aussi de cette transparence, des études sont menées sur l'imagerie THz des filigranes des billets de banque pour éventuellement développer un appareil de détection de faux billets ;
- Mise au point de caméra infrarouge ultrarapide de type "streak camera" basée sur l'absorption THz d'atomes de Rydberg. Les atomes de Rydberg sont des atomes dans un état énergétique très excité, leur énergie d'ionisation correspond à celle d'ondes THz. Une impulsion THz incidente sur un gaz d'atomes de Rydberg libère des électrons qui sont fortement accélérés et déviés par une rampe de tension. La distribu-

tion spatiale de ces électrons donne la forme temporelle de l'impulsion THz. Ces travaux sont réalisés par le groupe de B. Noordaam à Amsterdam.

5. Conclusion

Le domaine des ondes THz bénéficie depuis une dizaine d'années de nouvelles techniques, en particulier de sources et de détecteurs travaillant dans le domaine temporel, et qui possèdent une très grande dynamique ainsi qu'une bande passante équivalente extrêmement large. Maintenant que les techniques expérimentales sont bien au point, on voit apparaître de plus en plus d'applications des ondes THz.

Ces applications sont basées sur deux points forts :

- Spectres de vibration et rotation des molécules qui conduisent à une analyse physico-chimique originale ;
- Transparence de nombreux matériaux, en particulier les diélectriques, qui permet l'échographie d'objets inhomogènes.

Le développement de ces techniques, et leur transfert du laboratoire aux entreprises, est certainement tributaire de la mise au point de systèmes compacts et sensibles. Des solutions apparaissent déjà, comme les systèmes utilisant des lasers à fibre optique. On peut espérer que d'autres perfectionnements techniques apparaîtront bientôt, faisant des ondes THz un outil d'investigation puissant à la disposition du plus grand nombre.

Jean-Louis Coutaz est professeur de physique à l'Université de Savoie, où il dirige le Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation (LAHC). Auparavant, il était chargé de recherches au CNRS et il travaillait sur les phénomènes d'optique non linéaire d'ordre 2. Ses recherches actuelles portent sur l'optoélectronique ultrarapide (spectroscopie THz, échantillonnage électro-optique, semi-conducteurs III-V non stœchiométriques). Il est le coordinateur du programme européen DUO (Devices for Ultrafast Optoelectronics).

Lionel Duville est maître de conférences à l'Université de Savoie. Sa thèse, effectuée à l'IEF d'Orsay, portait sur l'échantillonnage électro-optique. Au sein du LAHC, il a la charge des activités de spectroscopie THz et d'échantillonnage électro-optique.

Frédéric Garet est maître de conférences à l'Université de Savoie. Pendant sa thèse, il a construit et développé le banc de spectroscopie THz du LAHC. Ses travaux actuels portent sur l'amélioration des performances de ce banc et sur les semi-conducteurs rapides.