

Des ondes térahertz pour la 6G

Guillaume Ducournau, université de Lille, CNRS

dans La recherche mensuel 561

daté juillet-août 2020 - 1750 mots

Connecter ultra-rapidement les objets mobiles est l'un des défis du XXI^e siècle. En ouvrant ces réseaux aux ondes térahertz, le débit des échanges pourrait atteindre en leur coeur la barre du téraoctet par seconde, et être cent fois plus élevé qu'aujourd'hui pour les utilisateurs. À condition de parvenir à maîtriser cette technologie complexe.

Les données contenues dans les objets mobiles tels les téléphones et tablettes dépassent maintenant celles des stations fixes. En 2017, plus de 275 téraoctets de données étaient échangées par ces objets mobiles dans le monde toutes... les minutes ! D'ici à 2022, les smartphones représenteront plus de 90 % du trafic de données mobiles et la 5G 12 % du trafic mobile total. Cependant, alors que les communications par fibre optique ont atteint des vitesses de transmission largement supérieures au téraoctet par seconde (100 000 fois l'ADSL), la vitesse de connexion sans fil, bien que multipliée par deux en gros tous les 18 mois (1), reste le goulot d'étranglement des échanges de données, avec des débits de l'ordre de la dizaine de mégabits par seconde dans de bonnes conditions. Or les nouveaux usages, tels que le streaming vidéo haute définition, les jeux en ligne, la réalité augmentée, bientôt les véhicules autonomes, la chirurgie à distance en temps réel, requièrent l'acheminement de masses de données à des débits toujours supérieurs. Cette pression de la demande des utilisateurs nomades implique une croissance considérable de la connectivité, de la densité et du volume du trafic de données.

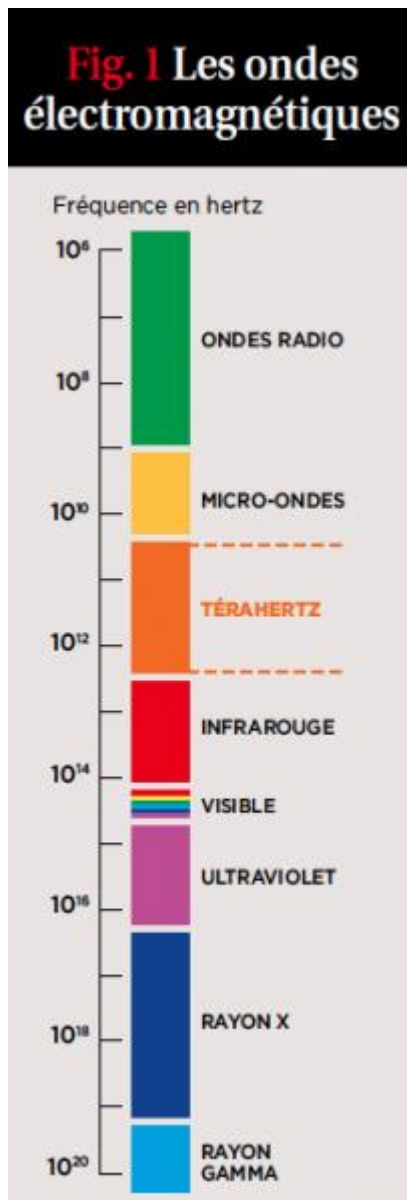
À cet égard, les réseaux 5G prévoient déjà des densités de trafic de plusieurs téraoctets par seconde et par kilomètre carré, ce qui permettra d'atteindre un débit dix fois supérieur à celui de nos smartphones aujourd'hui. Dans cette quête du haut débit, chaque technologie possède sa capacité à véhiculer un certain nombre d'informations binaires (0 ou 1) par seconde, ce débit étant acheminé sur une certaine distance de transmission. La fibre optique n'a de concurrent ni pour le débit, ni pour la distance de transmission, mais elle ne permet pas de desservir des utilisateurs nomades, d'où l'intérêt des ondes radio « sans fil ».

Différentes technologies doivent donc coexister pour couvrir l'ensemble des scénarios d'utilisation. Cependant, le volume de données a tendance à exploser sur les réseaux sans fil, et les fréquences utilisées par ces systèmes arrivent aujourd'hui à saturation. En exploitant uniquement les fréquences actuelles, il serait impossible de fournir à chacun l'ultra-haut débit. De fait, depuis les débuts de la radio et les premières expériences du physicien italien Guglielmo Marconi, il y a plus d'un siècle, la demande a augmenté de telle façon qu'il a fallu repousser les gammes de fréquences utilisées. Et il est à prévoir que les fréquences au-delà de 100 GHz seront exploitées dans les futurs systèmes de communication. Pour donner des ordres de grandeur, l'électronique « usuelle » utilise actuellement des fréquences jusqu'à environ 100 GHz. Les fours à micro-ondes ou le wi-fi fonctionnent autour de 2,45 GHz, les radars automobiles au-delà de 20 GHz.

Antennes non adaptées

Face à cette problématique, les ondes radio très haute fréquence (au-delà du wi-fi) pourraient être une solution. Il s'agit des ondes térahertz ou ondes T : on parle alors de systèmes TiFi, une brique de base pour la 6G. Leurs longueurs d'onde sont inférieures au millimètre (Fig. 1), soit 100 à 1 000 fois plus petites que celles

qui sont utilisées pour le wi-fi. Il est de ce fait techniquement plus difficile de les créer et de les détecter, en particulier parce que les dispositifs qui engendrent ces ondes sont à la fois aux limites de l'optique et de l'électronique : les longueurs d'onde sont très petites pour l'électronique et très grandes pour l'optique. Cela impose notamment des contraintes sur la miniaturisation des dispositifs. À cet égard, les antennes disponibles sur le marché ne sont pas adaptées aux ondes térahertz. Par ailleurs, la vitesse de transmission des ondes T est contrainte par les lois de la physique. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de transmission des communications, il est nécessaire d'augmenter la fréquence de fonctionnement des systèmes actuels (nos téléphones fonctionnent à des fréquences de quelques gigahertz). En effet, la transmission des signaux s'effectue sur une onde « porteuse », le signal de base sur lequel les informations sont encodées. Plus la fréquence de l'onde porteuse est grande, plus le débit sera important. En règle générale, on compte, en wi-fi, un facteur 50 entre la valeur de la fréquence porteuse et le débit maximal qu'elle peut transmettre. Ainsi, un système wi-fi peut atteindre des débits de quelques dizaines de mégabits par seconde en utilisant une fréquence porteuse autour de 2,4 GHz. Quant aux fibres optiques des réseaux sous-marins, la fréquence porteuse du signal lumineux est très élevée (193,4 THz) et le signal peu atténué lors de son voyage dans la fibre, ce qui permet des débits extrêmement élevés sur de grandes distances.



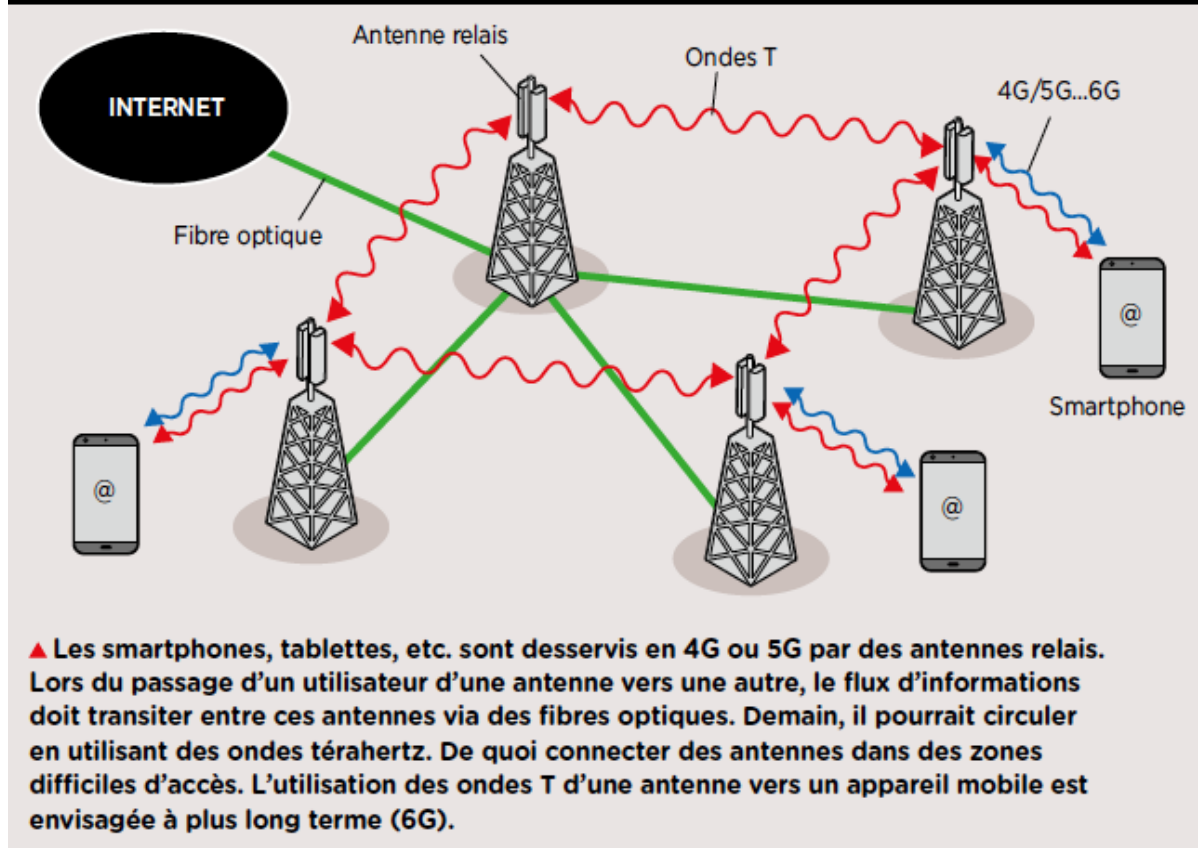
Comment poser les premières briques de la 6G dans ce cas ? Il n'existe pas encore, à ce jour, d'instrument capable d'émettre et de recevoir les ondes térahertz de façon efficace. Fabriquer des émetteurs et des

récepteurs dédiés à cette gamme de fréquences représente donc un défi scientifique et technique pour de nombreux laboratoires, y compris le nôtre, à Lille. Depuis une dizaine d'années, des démonstrateurs utilisant des technologies issues de la photonique (optique) et de l'électronique **ont été mis au point**. Dans le monde, plusieurs groupes de recherche ont ainsi pu atteindre la barre des 100 Gbit/s, ce qui revient à échanger 3 DVD complets par seconde. Ces performances sont réalisées en laboratoire, afin de valider les différentes technologies. Les plus grands débits ont été obtenus avec des émetteurs photoniques, très performants en termes de qualité du signal et de débit. Malheureusement, leur portée reste pour le moment limitée à quelques dizaines de mètres. Au contraire, les technologies électroniques ont permis des communications sur de plus longues distances, de l'ordre du kilomètre. Ces émetteurs utilisent des systèmes d'amplification fondés sur l'utilisation de transistors poussés aux limites technologiques actuelles, dont les applications commerciales pourraient arriver dans quelques années.

Utilisation du silicium

La pleine utilisation des fenêtres de communication en ondes T autoriserait, en encodant l'information sur plusieurs fréquences, sur différentes polarisations des ondes, et en jouant sur la complexité des signaux transmis, des débits de l'ordre du téraoctet par seconde, ce qui rendrait possible le déploiement de réseaux pour l'après-5G (**Fig. 2**). À ce jour, il existe assez peu de démonstrations sur le terrain, même si cela va certainement augmenter progressivement dans les prochaines années. Ce passage des technologies de laboratoire aux démonstrations sur le terrain est une étape nécessaire, mais pas toujours aisée, sur des technologies en cours de maturation.

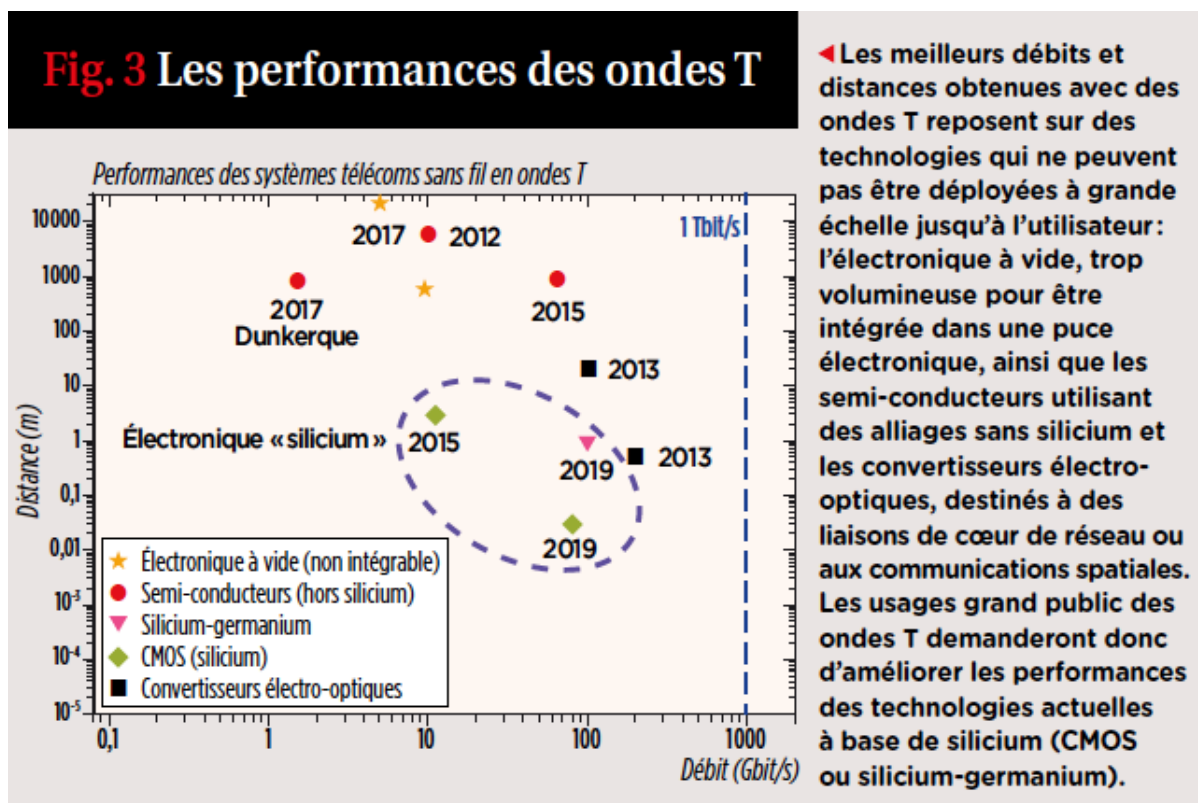
Fig. 2 Au cœur du réseau mobile



En France, notamment sur le campus lillois (université de Lille, CNRS, I-Site Ulne), les efforts de plusieurs laboratoires (IEMN, PhLAM et Ircica) depuis dix ans ont permis de lever plusieurs verrous technologiques. Il y

a eu notamment la mise au point de convertisseurs électro-optiques pour convertir directement en ondes T des signaux émanant des réseaux de fibres optiques. Elle a permis d'atteindre, en laboratoire, un débit de 100 gigabits par seconde, dans la bande de 300 GHz. Il s'agit du débit le plus important obtenu à ce jour, en utilisant un seul signal porteur térahertz. Cette approche pourrait encore gagner en performance si on l'associe à des dispositifs actifs (transistors) adaptés aux ondes T.

L'intégration de ces technologies dans le futur est un point essentiel, et dépendra des scénarios d'application et du coût des composants. Les technologies issues du silicium (photonique et électronique), utilisées dans les centres de données et donc déjà commercialisées, pourraient se substituer aux dispositifs de pointe réalisés en laboratoire dans le cadre des démonstrations citées plus haut. Ainsi, il a été aussi montré récemment, pour la première fois, qu'un dispositif de photonique sur silicium, conçu par la firme STMicroelectronics pour les communications dans les centres de données, pouvait servir de convertisseur optique-onde T pour les communications à courte distance. Par ailleurs, en 2017, à Dunkerque, hors du laboratoire, notre équipe est parvenue à transmettre un signal en onde T sur une distance de l'ordre du kilomètre, avec un flux vidéo Full HD en temps réel (Fig. 3).



Ces réussites expérimentales ne doivent toutefois pas occulter une barrière technologique majeure, que la communauté scientifique qualifie de « mur térahertz ». En effet, même pour des distances de transmission inférieures à 1 kilomètre, le signal térahertz subit une atténuation importante. Cette déperdition s'explique principalement par la capacité limitée de l'antenne à concentrer le signal vers le récepteur (ce qui se compense avec une antenne de plus grande taille). Au-delà d'1 kilomètre, un autre facteur entre en jeu : l'atmosphère, l'air étant un absorbeur efficace de ces ondes. Pour dépasser cette distance, il serait nécessaire d'augmenter la puissance émise, mais les dispositifs n'existent pas encore.

De nombreux défis à relever sont également associés à la manipulation de ces ondes T. Si les démonstrations précédentes ont été concluantes avec des émetteurs et récepteurs fixes, il faudra les adapter à des récepteurs mobiles. Et si l'on veut que ces antennes échangent des informations avec un smartphone, il faudra ajouter, dans les futurs systèmes, des fonctions comme le filtrage et la modulation intégrée du signal, un contrôle de

la polarisation, une commande du faisceau et des modules de traitement du signal térahertz, entre autres pour compenser les variations de propagation de ces ondes dans l'air ou encore bien suivre les utilisateurs mobiles. Afin de parvenir à une utilisation optimale, il sera nécessaire d'élaborer des dispositifs de multiplexage/démultiplexage permettant le mélange ou la séparation de plusieurs fréquences d'ondes T. À ce titre, en 2017, notre équipe [était parvenue](#) à réaliser un démultiplexage de deux chaînes de télévision codées par ondes T simultanément.

Toutes ces expérimentations mettent en exergue le potentiel des ondes T pour les communications. Un premier standard international pour ces gammes de fréquences a d'ailleurs été créé récemment, preuve de l'intérêt grandissant pour le TiFi (lire l'encadré ci-dessous). Certains prototypes répondent même déjà à des critères d'application à grande échelle. Il est maintenant nécessaire d'aboutir à des filières de fabrication de composants stables, fiables et bon marché, d'intégrer ces technologies et de pousser à leur limite les distances de transmission pour envisager un déploiement grandeur nature dans la perspective de la 6G. Cela nécessitera des investissements industriels et un important travail d'ingénierie. L'augmentation du débit et l'efficacité énergétique (énergie par bit d'information transmise) seront aussi des points essentiels à prendre en compte de façon globale pour ces nouvelles solutions de communication. En effet, le débit offert par ces ondes pour répondre à la demande en connectivité doit être atteint sans exploser la consommation d'énergie, ce qui reste encore un défi. Cependant, les infrastructures de communication sont essentielles (le télétravail massif lors de la crise du Covid-19 les ayant mises à rude épreuve), il est vital de rester dans cette course de vitesse.

PHYSICIEN Guillaume Ducournau est professeur à l'université de Lille. Spécialiste des télécommunications sans fil, il mène ses recherches à l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN).

CONTEXTE

Les réseaux sans fil sont soumis à une pression croissante sur le volume de données à livrer aux utilisateurs. Par ailleurs, pour de nouveaux usages, comme la chirurgie à distance en temps réel ou les véhicules autonomes, ces réseaux ne devront souffrir d'aucun temps de latence, ce qui nécessite d'augmenter drastiquement leur débit. Pour cela, les ondes térahertz seraient une solution de choix.

UN PREMIER STANDARD

En 2017, l'organisation internationale Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a proposé un premier standard pour les ondes T : l'IEEE 802.15.3d, équivalent de la norme IEEE 802.11 pour le wi-fi. À la dernière conférence sur les radiocommunications, en 2019, les fréquences entre 252 et 450 GHz ont été officiellement ouvertes pour les communications mobiles en ondes T. **G. D.**

À CHAQUE USAGE, SA TECHNOLOGIE

Les fibres optiques, la téléphonie mobile (3G, 4G, 5G...), le wi-fi : toutes ces technologies des télécoms ont pour but de nous interconnecter. La technologie utilisée dépend directement de la localisation de l'émetteur et du récepteur. Par exemple, sur un réseau à fibre optique, l'émetteur et le récepteur sont fixes ; cela correspond principalement aux coeurs de réseaux mondiaux (réseaux sous-marins), aux communications fixes entre les grosses villes, et maintenant cela couvre les habitations progressivement reliées à la fibre. Les réseaux cellulaires (3G, 4G, 5G) ont pour mission principale de relier des récepteurs portables à une station de base (antenne), gérant une zone géographique de 1 km (zones urbaines) à 10 km (zones moins denses) en moyenne, avec des performances dépendant grandement du lieu, de la géographie, de la densité de construction... Les réseaux wi-fi gèrent quant à eux

des communications à plus courte distance, à l'échelle d'un petit bâtiment, d'un train..., en utilisant les ondes radio. Le LiFi, utilisant de la lumière véhiculée dans l'air, permet aussi de couvrir, au sein d'une salle de réunion, plusieurs utilisateurs fixes avec plus de vitesse que le wi-fi. **G. D.**