

# TÉLÉCOMMUNICATIONS

## sans fil térahertz

Guillaume DUCOURNAU, Maître de Conférences HDR à l'IEMN, Université de Lille  
[guillaume.ducournau@iemn.univ-lille1.fr](mailto:guillaume.ducournau@iemn.univ-lille1.fr)

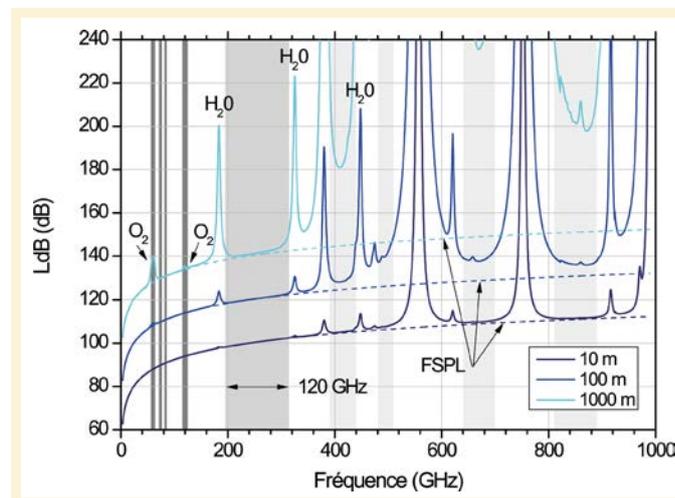
Avec la montée en capacité des réseaux de communication sans fil, largement tirée par les usages et la mobilité, de nouveaux systèmes de communication doivent être développés. La gamme de fréquence « térahertz », qui est à la fois l'optique des grandes longueurs d'ondes (infrarouge très lointain) et l'électronique des très hautes fréquences (à la limite des capacités intrinsèques des transistors), peut être une très bonne candidate pour ces applications.

Depuis toujours le besoin de communiquer a guidé le développement des technologies de transport de l'information. Aujourd'hui, la capacité des transmissions par câbles en cuivre a été largement dépassée par les technologies de l'optique guidée sur fibre pour les longues distances (réseaux sous-marins, métropolitains), mais également à plus petite échelle avec les liaisons optiques pour remplacer les bus de données dans les calculateurs haute vitesse, ces technologies étant de plus en plus développées en technologie « photonique sur silicium », le niveau d'intégration permettant la compacité requise. Une révolution à venir pour la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle est l'avènement des technologies pour le développement massif des technologies sans fil. En effet, avec l'augmentation sans cesse croissante du trafic IP (Internet Protocol), le trafic attendu par mois est de 130 exaoctets (1 Eo =  $10^{18}$  octets) à l'horizon 2018 [1].

Avec l'évolution des usages, la plus forte croissance est attendue au niveau des réseaux de communications sans fil, qui sont aujourd'hui le maillon le plus faible en termes de débit de données, bien que de plus en plus de services en ligne soient entrés dans les usages de masse. Depuis les débuts de la radio avec les expériences de G. Marconi, la fréquence « porteuse », qui est le support de l'information, n'a eu

de cesse de croître et, dans la perspective des futurs réseaux de communication, les systèmes de transmission sans fil utiliseront la gamme de fréquences « térahertz » (1 THz =  $10^{12}$  hertz) à l'horizon 2020 [2], ne serait-ce que pour augmenter la capacité du réseau entre chaque station de base. Le théorème de Shannon, permettant d'évaluer la capacité des systèmes de transmission ( $C = B \log_2(1+S/N)$ , où  $C$  est la capacité en bit/s,  $B$  la bande passante en Hz, et  $S/N$  le rapport signal à bruit), nous rappelle que l'augmentation en capacité passera par une augmentation de la bande passante  $B$ ; cependant, le spectre électromagnétique est déjà saturé. Ceci a amené à l'ouverture récente des bandes de communication à 60 GHz puis en « bande E », entre 71-76 GHz et 81-86 GHz (1 GHz =  $10^9$  hertz).

Néanmoins, ces nouvelles bandes de fréquences ne donneront accès qu'à environ 7 GHz par sous-bande (donc limitant le débit même si des codages de signaux avancés pourraient permettre d'atteindre la dizaine de Gbit/s) et, pour atteindre plusieurs dizaines de Gbit/s, une augmentation de la fréquence de fonctionnement au-delà de 100 GHz devient incontournable. En effet, la bande relative des circuits reste limitée dans le sens où celle-ci est en général plafonnée à 10 ou 15 % autour de la fréquence centrale. Ainsi la gamme de fréquence « térahertz » qui s'étend, pour les opticiens, de 0,3 THz à 30 THz et de 0,1 THz à 10 THz pour les électroniciens est, depuis maintenant plusieurs années, source de toutes les attentions pour répondre à la problématique des communications sans fil



**Figure 1.** Bilan de liaison en gamme THz (utilisant la réponse atmosphère (dB/km) calculée à partir de [spectra.iao.ru/en/en/home/](http://spectra.iao.ru/en/en/home/) avec 2,59 % en composition d'eau).

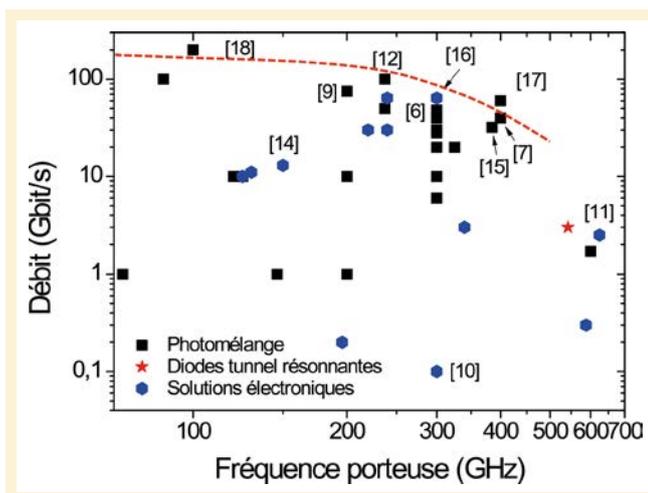


Figure 2. État de l'art (débit/porteuse) en communications THz.

à ultra-haut débit. De plus, les réseaux de transport optique étant développés par les PON (*passive optical networks*) jusque chez l'habitant avec le FTTH (*fiber to the home*), une convergence fibre/radio semble aujourd'hui de plus en plus d'actualité avec le FTTA (*fiber to the antenna*).

Au-delà des briques technologiques de base, reste à identifier les fréquences ad hoc pour la propagation en espace libre. L'atmosphère présente des caractéristiques d'absorption limitées aux pertes isotropiques (bilan de liaison avec des antennes omni-directionnelles) jusque 1 km (*figure 1*) pour les fréquences situées à l'extrémité supérieure de la bande « millimétrique », au-dessus de 220 GHz, avec l'avantage majeur que les bandes au-dessus de 275 GHz n'ont pas encore été allouées à des applications spécifiques, et les efforts de normalisation sont en cours à l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). En l'occurrence, un groupe de travail est en train d'étudier la mise en place d'un standard pour le 100 Gbit/s à ces fréquences [3].

On peut donc prévoir que d'ici 2020, le spectre THz sera exploré pour l'utilisation de communications sans fil ultra-rapides. On peut raisonnablement penser que le débit de données prospectif pour les communications sans fil sur le marché sera de l'ordre de 100 Gbit/s d'ici 10 ans. Ces débits de données seront par exemple essentiels pour le transport en temps réels de flux vidéo en haute définition. Par

exemple, le signal sortant d'une caméra HD a un débit de 1,5 Gbit/s, ce qui nécessite des techniques de compression pour l'adapter à travers la bande passante limitée de canaux de diffusion usuels (autour de 20 Mbit/s). En télévision « 4K », avec 4 fois plus de pixels que la HD usuelle, des débits au-delà de 6 Gbit/s en temps réel seront requis. Au-delà des applications de type « Broadcast » ou de communications inter-stations de base dans les futurs réseaux 6G, de telles applications de transfert de vidéo sans fil pourraient par exemple remplacer les nombreux câbles de transmission en salle d'opération chirurgicale, ou bien pour du déport de flux vidéo. Le développement des communications sans fils en gamme THz passera donc

par le développement de composants d'extrémité (sources, amplificateurs, détecteurs, antennes) capables de donner une marge en puissance compatible avec le bilan de liaison.

Différentes technologies ont été et sont actuellement développées dans les laboratoires pour réaliser les premiers démonstrateurs (de la même façon qu'au début des communications optiques guidées dans les fibres). Même si des solutions soit électroniques, soit photoniques ont été mises en place, il est assez clair, de par l'état de l'art actuel (*figure 2*), que les technologies principales derrière ces premiers démonstrateurs sont des technologies issues de la photonique, en l'occurrence des photodiodes ultra-rapides, à transport uni-polaire (UTC-PD) en technologie InGaAs/InP. Ces photodiodes, développées initialement par NTT (Nippon Telegraph and Telephone corporation) au Japon pour les étages de photoréception à 40 Gbit/s, ont été poussées jusqu'à leurs limites et ont permis de générer des signaux jusqu'à 2,5 THz [4]. Dans les bandes de fréquences appropriées aux applicatifs de communication (autour de 300 GHz), des niveaux de l'ordre du mW ont été atteints [5]. Le caractère largement accordable de la photonique (sur les raies optiques), associé à la technique de photo-mélange (*figure 3*),

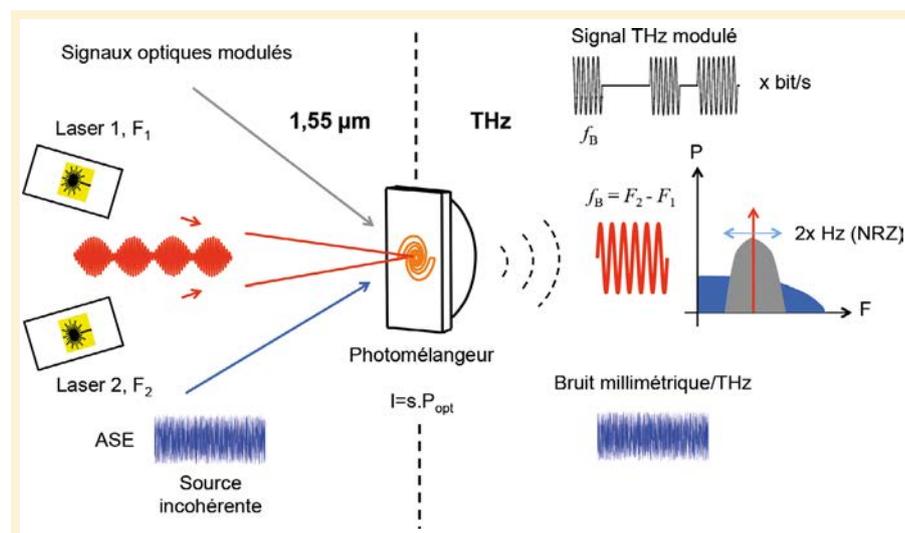
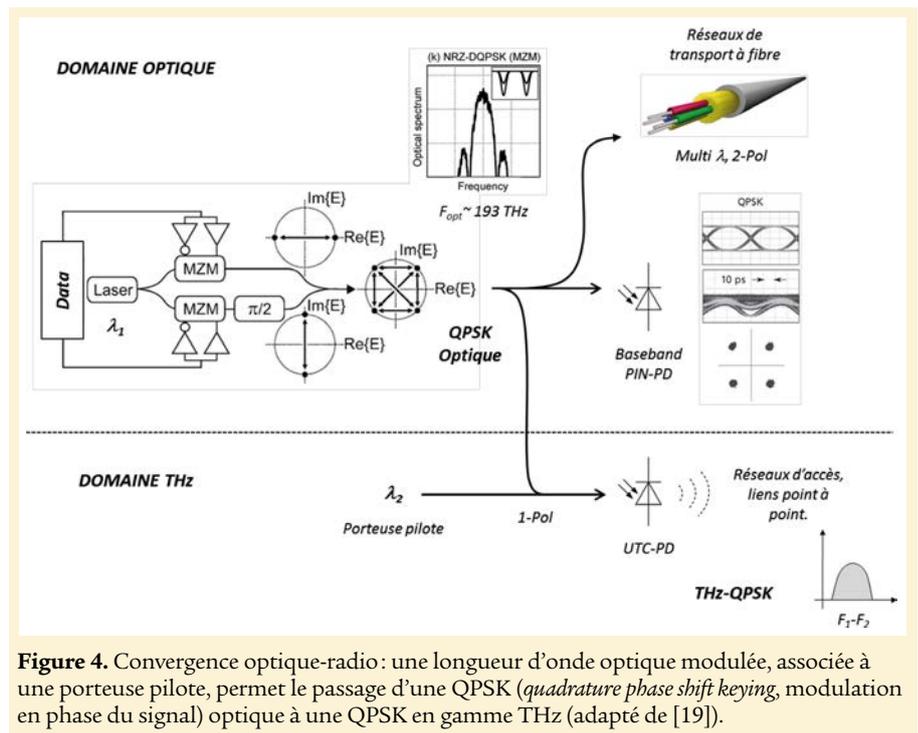


Figure 3. Technique de photomélangement pour la génération de signal THz en mode continu (rouge), en signal modulé (gris) en amplitude au format NRZ (*non return to zero*), ou en génération incohérente (bleu).

permet de transférer les techniques de génération optique vectorielles développées dans les années 2000-2010, et mures technologiquement, dans la gamme THz. Les photodiodes ultra-rapides peuvent donc devenir un pont direct entre l'optique fibrée et le réseau radio à haute vitesse (convergence optique/radio, comme détaillé à la figure 4).

Les techniques issues du photomélangage ont l'avantage de produire un indice de modulation très élevé de l'onde optique, donc de l'onde THz produite par mélange. De plus, la technique de photo-mélange permet assez facilement, par rajout de longueurs d'ondes supplémentaires, de réaliser une communication multi-fréquence, ce qui est très difficile à transposer en électronique. Ainsi, sur la base des techniques optiques/THz couplées avec des récepteurs THz utilisant des mélangeurs à diode Schottky développés initialement pour la radio-astronomie, des débits comparables aux débits transportés dans les canaux WDM (*wavelength division multiplexing*) des fibres ont pu voyager sur porteuse THz: par exemple, l'équipe du Professeur Nagatsuma au Japon, pionnier des communications THz, a montré sur la base des développements technologiques réalisés au NTT des



**Figure 4.** Convergence optique-radio: une longueur d'onde optique modulée, associée à une porteuse pilote, permet le passage d'une QPSK (*quadrature phase shift keying*, modulation en phase du signal) optique à une QPSK en gamme THz (adapté de [19]).

transmissions jusque 50 Gbit/s à 0,3 THz avec une performance en temps réel en modulation d'amplitude ASK (*amplitude shift keying*, modulation en amplitude du signal) [6], soit environ 1000 fois le Wi-Fi actuel! En France, des travaux ont par exemple été menés sur des communications très large bande à l'IEMN et des signaux ASK jusque 46 Gbit/s ont pu être mesurés à 0,4 THz [7]. La problématique du bruit de phase des sources optiques

amenant le besoin d'un traitement de signal au récepteur, des signaux complexes sont maintenant déjà utilisés en gamme THz pour améliorer l'efficacité spectrale de la liaison car, même si la bande passante disponible est très grande, la présence de services d'observation (radio-astronomie, météo) dans cette gamme de fréquence fera que la future allocation fréquentielle des canaux THz sera en sous-bandes, comme le représente la

## SPECTROGON

State of the art products

### Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



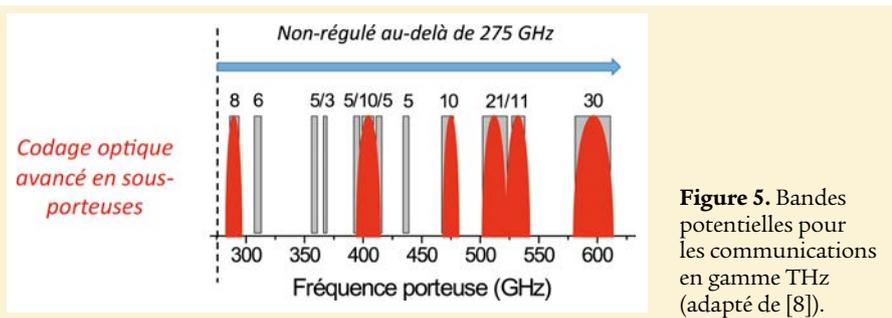
### Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000  
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800  
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

[www.spectrogon.com](http://www.spectrogon.com)



**Figure 5.** Bandes potentielles pour les communications en gamme THz (adapté de [8]).

figure 5. L'utilisation des réseaux optiques cohérents et des « flexgrids » couplés à une porteuse pilote permet alors d'obtenir un fonctionnement multi-spectral en gamme THz, comme illustré à la figure 5. Ainsi, des liens de 60 Gbit/s à 0,2 THz [9] ont été démontrés. La course est maintenant lancée pour atteindre la cible du 100 Gbit/s, qui devrait être normalisée dans les années à venir sur des bandes de fréquence au-delà de 275 GHz.

Les techniques issues de l'électronique sont également en plein développement, les premiers démonstrateurs en laboratoire ayant été réalisés d'abord sur la base de composants III-V développés pour la radioastronomie [10,11], mais aussi avec des circuits dédiés à transistors HEMTs [12]. Il est important de signaler que les plus hauts débits ont d'abord été atteints en utilisant des technologies issues de la photonique à l'émission, tirant parti des grandes bandes passantes associées aux dispositifs opto-électroniques. Néanmoins, pour faire face à la limitation de la puissance généralement disponible en sortie des dispositifs photoniques (état de l'art autour du mW à 300 GHz), l'avenir des systèmes THz à base de transmetteurs photoniques peut être basée sur la combinaison d'amplificateurs à état solide (transistors HBT sur InP par exemple) associés aux photomélangeurs. En outre, le développement des liens THz peut également bénéficier des récents développements en technologie de photonique sur silicium. Par exemple, à 180 GHz des photomélangeurs Ge sur Si ont montré des PIRE (puissance isotrope rayonnée équivalente) supérieures à -15 dBm dans la bande

170 GHz–190 GHz [13], avec le niveau d'intégration associé à ces technologies. Enfin, dans la perspective de futurs liens de transmission THz à cout réduit et basse consommation, les technologies CMOS sont également envisagées, et les premières communications en intérieur ont permis la transmission de plusieurs Gbit/s à 130 GHz [14]. Ainsi, tel le développement des premiers MODEMS ou les premières transmissions optiques, les communications en gamme THz laissent présager de grandes performances et de nouveaux usages dans les deux décennies à venir [20].

## Remerciements

G. Ducournau remercie l'ensemble des membres du groupe Photonique THz de l'IEMN, dirigé par Jean-François Lampin, Directeur de Recherches au CNRS. G.D. tient à remercier également l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le financement du programme COM'TONIQ « Infra 2013 » sur les communications THz (ANR - 13 - INFR- 0011-01), et le soutien de plusieurs programmes de recherche français et établissements : l'Université de Lille, l'IEMN (centrale de la caractérisation RF MEMS, centrale de micro-nano fabrication et plate-forme télécom de l'IEMN, l'institut IRCICA USR CNRS 3380), le CNRS et le réseau RENATECH en France. Ce travail a également été en partie soutenu par les programmes d'investissement d'avenir Equipex FLUX 0017, le projet Excelsior, la région Nord-Pas de Calais, le soutien du FEDER, et le CPER « Photonics for society ».

## RÉFÉRENCES

- [1] White Paper, The Zettabyte Era: Trends and Analysis, CISCO (May 2015)
- [2] T.S. Bird, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2011), Keynote, Australia (2011)
- [3] <http://www.ieee802.org/15/pub/IGthzOLD.html>
- [4] T. Ishibashi et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20(6) (2014)
- [5] H.-J. Song et al., *IEEE Microwave and Wireless Component Letters* 22(7) (2012)
- [6] T. Nagatsuma et al., *IEICE Trans. Electronics* E98-C(12), 1060-1070 (2015)
- [7] G. Ducournau et al., *IEEE Trans. Terahertz Science and Technologies* 4(3), 328-337 (2014)
- [8] S. Priebe et al., IEEE IG THz Group Document, <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/12/15-12-0324-00-0thzinterference-between-thz-communications-and-spaceborne-earth-exploration-services.pdf>, accessed 31 January 2016.
- [9] H. Shams et al., *Optics Express* 22(19), 23465-23472 (2014)
- [10] C. Jastrow et al., *Electronics Letters* 46(9), 661-663 (2010)
- [11] L. Moeller et al., *Electronics Letters* 47(15), 856-858 (2011)
- [12] S. Koenig et al., *Nature Photonics* 7(12), 977-981 (2013)
- [13] S.M. Bowers, et al., Optical Fiber Communications Conference (OFC), USA (2014)
- [14] M. Fujishima et al., *IEICE Trans. Electronics* E98-C(12), 1091-1104 (2015)
- [15] G. Ducournau et al., *Electronics Letters* 12(11), 915-917 (2015)
- [16] I. Kallfass et al., *IEICE Trans. Electronics* E98-C(12), 1081-1088 (2015)
- [17] X. Yu et al., International conference on Photonics in Switching (PS2015), Italy (2015)
- [18] X. Li et al., *Optics Express* 21(16), 187894-187899 (2013)
- [19] P.J. Winzer, *IEEE Proceedings* 94(5), 952 (2006)
- [20] T. Nagatsuma et al., *Nature Photonics* 10, 371 (2016)