

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2352-0
(06/2015)

Orientations technologiques des services actifs dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz

Série SM
Gestion du spectre

15 
1865-2015



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Rapports UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REP/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Services par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre

Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2015

© UIT 2015

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RAPPORT UIT-R SM.2352-0

Orientations technologiques des services actifs dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz

(2015)

Domaine d'application

Le présent Rapport décrit les orientations technologiques des services actifs dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz. Il vise à fournir des informations techniques pour l'élaboration d'études de partage et de compatibilité entre les services actifs et les services passifs, ainsi qu'entre les services actifs eux-mêmes dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz.

TABLE DES MATIÈRES

		<i>Page</i>
1	Introduction	3
2	Propriétés, caractéristiques et applications types des ondes térahertz.....	4
	2.1 Description générale de la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz.....	4
	2.2 Caractéristiques de la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz	4
	2.3 Principales applications des ondes térahertz.....	5
3	Informations réglementaires	7
4	Communications hertziennes térahertz.....	8
	4.1 Cas d'utilisation possibles des systèmes de communication térahertz.....	8
	4.2 Emetteurs-récepteurs en ondes térahertz	13
5	Détection et imagerie.....	16
	5.1 Méthodes de génération d'ondes térahertz.....	16
	5.2 Caméras térahertz	19
	5.3 Spectroscopie.....	22
	5.4 Essais non destructifs.....	23
6	Activités des organismes internationaux de normalisation sur les ondes térahertz.....	25
7	Résumé	27
8	Bibliographie	27

Abréviations et acronymes

ATR	spectrométrie à réflexion totale atténuée (<i>Attenuated total reflection spectrometry</i>)
BER	rapport d'erreur de bit (<i>Bit error ratio</i>)
BNA	N-Benzyl-2-Methyl-4-Nitroaniline
BWO	oscillateur à ondes régressives (<i>Backward-wave oscillator</i>)
DAST	trifluorure de diéthylaminosulfure (<i>Diethylaminosulfur Trifluoride</i>)
DFG	génération par différence de fréquence (<i>Difference frequency generation</i>)
FEL	laser à électrons libres (<i>Free-electron laser</i>)
FTIR	spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (<i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>)
HBT	transistor bipolaire à hétérojonction (<i>Heterojunction bipolar transistor</i>)
HEMT	transistor à haute mobilité d'électrons (<i>High electron mobility transistor</i>)
IMPATT	avalanche et temps de transit (<i>Impact ionization avalanche transit-time</i>)
LoS	visibilité directe (<i>Line of sight</i>)
LT-GaAs	arséniure de gallium épitaxé à basse température (<i>Low temperature grown Gallium Arsenide</i>)
MMIC	circuit intégré monolithique hyperfréquences (<i>Monolithic microwave integrated circuit</i>)
NEP	puissance équivalente de bruit (<i>Noise equivalent power</i>)
NFC	communications en champ proche (<i>Near field communication</i>)
NLoS	sans visibilité directe (<i>Non line of sight</i>)
QCL	laser à cascade quantique (<i>Quantum cascade laser</i>)
RTD	diode à effet tunnel résonnant (<i>Resonant tunnelling diode</i>)
TDS	spectroscopie dans le domaine du temps (<i>Time domain spectroscopy</i>)
TNNETT	effet tunnel et temps de transit (<i>Tunnel injection transit-time</i>)
THz	téraherz
UTC-PD	photodiode à transport unipolaire (<i>Uni-traveling-carrier photodiode</i>)

Références

Recommandation UIT-R P.676:	Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère
Recommandation UIT-R P.838:	Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie destiné aux méthodes de prévision
Recommandation UIT-R P.840:	Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard
Rapport UIT-R F.2107-2:	Caractéristiques et applications des systèmes hertziens fixes fonctionnant dans les gammes de fréquences comprises entre 57 GHz et 134 GHz (disponible en anglais seulement)

1 Introduction

Dans le Règlement des radiocommunications (RR), les bandes de fréquences au-dessus de 275 GHz ne sont pas attribuées à des services particuliers, mais identifiées pour les services passifs. La réglementation du spectre pour les fréquences au-dessus de 3 000 GHz est encore à l'étude, conformément à la Résolution 118 (Marrakech, 2002) de la Conférence de plénipotentiaires. A la Conférence mondiale des radiocommunications de 2012 (CMR-12), le numéro **5.565** du RR a été modifié en application de la Résolution **950 (Rév.CMR-07)**, de sorte que des bandes de fréquences au-dessus de 275 GHz ont été identifiées pour être utilisées par les administrations pour les applications des services passifs, tels que le service de radioastronomie, le service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et le service de recherche spatiale (passive). Toutefois, l'utilisation de la gamme de fréquences 275-1 000 GHz par les services passifs n'exclut pas l'utilisation de cette gamme par les services actifs.

La nouvelle Question UIT-R 237/1, intitulée «Caractéristiques techniques et opérationnelles des services actifs», a été élaborée et approuvée en 2013, afin d'encourager les administrations à étudier les caractéristiques techniques et opérationnelles des services actifs dans la gamme de fréquences 275-1 000 GHz. Outre l'étude des caractéristiques techniques et opérationnelles, il est prévu de mener des études de partage entre les services actifs et les services passifs ainsi qu'entre les services actifs eux-mêmes, compte tenu de ces caractéristiques et conformément à la nouvelle Question UIT-R 237/1.

Grâce aux progrès des technologies récentes au-dessus de 275 GHz, il est possible de mettre au point des applications sophistiquées qui utilisent des dispositifs et circuits intégrés fonctionnant au-dessus de 275 GHz, telles que la spectroscopie, l'imagerie, les essais non destructifs et les caméras térahertz. Les avantages de ces hautes fréquences résident dans l'utilisation d'une bande ultra-large qui ne peut pas être allouée dans les bandes d'ondes hyperfréquences et millimétriques, mais ces avantages ne sont pas encore exploités pour élaborer des systèmes de communication hertziens à ultra-haut débit.

Pour mettre à profit les avancées des technologies térahertz (THz) dans le contexte des applications de radiocommunication, il est indispensable de comprendre les orientations technologiques suivies actuellement par les services actifs dans les bandes de fréquences au-dessus de 275 GHz.

Outre les progrès des technologies térahertz, l'IEEE 802 a récemment créé le groupe de travail IEEE 802.15.3d, chargé d'élaborer une norme IEEE 802 qui comprenne en outre une couche physique fonctionnant au-dessus de 275 GHz. Cependant, la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz n'a pas encore fait l'objet d'identifications pour les services actifs, et aucun service ne bénéficie encore d'une attribution dans cette gamme dans le Règlement des radiocommunications. De plus, il est urgent du point de vue réglementaire de comprendre les caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes actifs, afin d'éviter les brouillages entre les services passifs exploités dans cette gamme et les services actifs qui seront créés et déployés dans un proche avenir.

Le présent Rapport donne une vue d'ensemble des orientations technologiques des systèmes actifs actuellement à l'étude dans la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz, et vise à fournir des informations techniques pour l'élaboration d'études de partage et de compatibilité. Les technologies dont traite le présent Rapport concernent les communications hertziennes, la détection et l'imagerie en ondes térahertz.

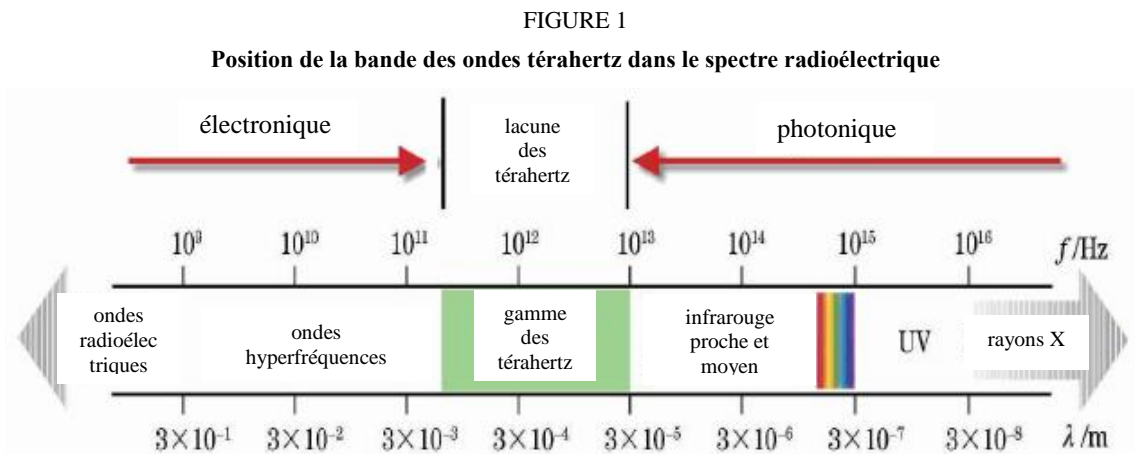
2 Propriétés, caractéristiques et applications types des ondes térahertz

Les communications hertziennes en ondes térahertz sont basées sur les communications hertziennes classiques, qui vont des ondes hyperfréquences et millimétriques aux ondes térahertz. Elles présentent par ailleurs des points communs avec les communications hertziennes par laser. Les communications hyperfréquences et par laser ne seront pas remplacées par les communications en ondes térahertz. Cependant, celles-ci présentent des avantages uniques dont sont dépourvues la majeure partie des communications hyperfréquences et par laser.

2.1 Description générale de la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz

La gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz représente la majeure partie de la bande des ondes térahertz. Les ondes térahertz, également appelées ondes sous-millimétriques, désignent en général la bande de fréquences comprise entre 0,1 THz et 10 THz, ce qui correspond à une longueur d'onde de 0,003 mm à 3 mm.

La Figure 1 représente la position de la bande des ondes térahertz dans le spectre électromagnétique.



2.2 Caractéristiques de la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz

En raison de ses propriétés uniques, la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz possède de nombreuses caractéristiques particulières qui la différencient des autres bandes de fréquences radioélectriques. Ses principales caractéristiques uniques sont les suivantes:

1) Haute permittivité

Les signaux radioélectriques dont la fréquence est supérieure à 275 GHz pénètrent facilement les matériaux diélectriques et les liquides non polaires. Ils permettent donc de procéder à l'imagerie des matériaux et objets opaques et pourraient être utilisés pour les essais non destructifs et dans le cadre des contrôles de sécurité et du contrôle qualité.

Par ailleurs, la longueur d'onde de ces signaux est plus longue que celle de la poussière et des particules de saleté présentes dans l'air, si bien que les affaiblissements de propagation dus à la poussière ou à la fumée sont très faibles. Ils pourraient donc être utilisés pour l'imagerie en présence d'une fumée importante, par exemple lors des interventions en cas d'incendie, ou d'une grande quantité de poussière due au vent, comme cela peut être le cas dans le désert.

2) **Affaiblissement rapide dans l'eau**

Les signaux radioélectriques dont la fréquence est supérieure à 275 GHz subissent un affaiblissement important dans l'eau, ce qui pourrait avoir des applications en médecine. En effet, la teneur en eau des tissus tumoraux est très différente de celle des tissus normaux, de sorte que les tissus cancéreux peuvent être localisés au moyen d'une analyse de la teneur en eau des tissus.

3) **Sûreté**

L'énergie photon des ondes térahertz n'est que de l'ordre du milli-électron-volt, ce qui est nettement inférieur à l'énergie de la plupart des liaisons chimiques. C'est pourquoi ces ondes ne risquent pas de provoquer de réaction d'ionisation, ce qui revêt un caractère crucial pour la détection des échantillons biologiques et l'examen du corps humain. En outre, l'eau possède un fort pouvoir d'absorption sur cette gamme de fréquences. Etant donné que les signaux radioélectriques émis dans cette gamme ne peuvent pas traverser la peau humaine et sont sans danger pour les personnes, ils pourraient être utilisés dans la détection médicale, par exemple pour détecter les maladies de la peau.

4) **Résolution spectrale**

La gamme des ondes térahertz contient de nombreuses informations spectrales, y compris des informations physiques et chimiques. Nombre de molécules, en particulier les molécules organiques, ont des propriétés de dispersion et d'absorption relativement élevées dans cette gamme. L'étude des propriétés spectrales des matériaux dans cette gamme pourrait nous permettre de comprendre les caractéristiques structurales des matériaux, d'en déterminer la composition et d'en analyser les propriétés physiques et chimiques.

5) **Haute résolution spatiale**

La gamme au-dessus de 275 GHz offre une résolution spatiale relativement meilleure que la bande des ondes hyperfréquences. Théoriquement, du fait de sa longueur d'onde plus courte, elle permet d'atteindre une résolution plus grande que la bande des ondes hyperfréquences dans les applications d'imagerie.

6) **Longueur d'onde courte et bonne directivité**

Les ondes térahertz ont une fréquence plus élevée que les ondes hyperfréquences, ce qui pourrait être exploité pour acheminer davantage d'informations par unité de temps. Parce qu'elle permet d'émettre des signaux de longueur d'onde plus courte et présente une bonne directivité, la gamme des ondes térahertz est très prometteuse pour certains cas d'utilisation des communications hertziennes.

2.3 **Principales applications des ondes térahertz**

Le développement de la recherche sur les ondes térahertz permet d'exploiter de mieux en mieux leurs caractéristiques exceptionnelles. Aujourd'hui, la gamme des ondes térahertz reste principalement utilisée pour les observations de radioastronomie, mais la mise au point de sources de rayonnement térahertz à puissance élevée ouvre la voie à de nombreuses autres applications. Les principales applications envisageables sont les suivantes:

1) **Applications à la radioastronomie**

Les rayonnements célestes et interstellaires contiennent quantité d'informations spectrales, dont un grand nombre se situe dans la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz, avec un bruit de fond nettement moins élevé. C'est pourquoi les toutes premières activités de recherche et développement concernant cette gamme ont été menées dans la perspective de son application à l'astronomie. Outre le télescope infrarouge et le télescope spatial Hubble, un radiotélescope térahertz a été inventé afin d'étudier l'état physique complexe du nuage interstellaire dans la galaxie, ce qui a donné lieu à la conception du plus grand télescope de l'infrarouge lointain au monde.

2) Application à la détection moléculaire

Toute matière a un mouvement. Même si un objet semble immobile, sa structure moléculaire interne est soumise à un mouvement rapide, puisque là où il y a du mouvement, il y a des rayonnements. Les rayonnements électromagnétiques ont leur propre fréquence ou longueur d'onde de vibration appelée «empreinte digitale». La plupart des «empreintes digitales» moléculaires se situent dans la gamme de l'infrarouge et dans la gamme au-dessus de 275 GHz. Le laser solide térahertz peut être utilisé pour détecter les rayonnements causés par les petites vibrations moléculaires qui ne peuvent pas être détectés à l'aide des rayons infrarouges.

3) Application aux contrôles de sécurité

Dans la mesure où la plupart des niveaux rotationnels moléculaires des explosifs et des drogues se situent dans le domaine des térahertz, la spectroscopie en ondes térahertz pourrait permettre de mener des contrôles de sécurité sur le corps humain, en vue de détecter la présence d'explosifs, de drogues, de macromolécules biologiques, d'armes et autres produits de contrebande. Contrairement aux techniques existantes qui utilisent les rayons X et l'imagerie ultrasonore, la spectroscopie et l'imagerie en ondes térahertz permettent de déterminer non seulement la forme des objets, mais aussi leurs propriétés matérielles, en comparant les rayonnements térahertz mesurés avec ceux de dangers connus stockés dans une bibliothèque. Par ailleurs, en raison de leur énergie très faible, les ondes térahertz ne sont pas de nature à engendrer une ionisation nocive des tissus biologiques. Elles sont donc exemptes des défauts des rayons X, qui sont potentiellement dangereux pour le corps humain et dont l'utilisation dans les détecteurs de métaux ne permet pas de détecter les objets non métalliques. Par conséquent, la technologie térahertz offre des perspectives d'application intéressantes dans le domaine des contrôles de sécurité.

4) Application à la biomédecine

Les signaux radioélectriques dont la fréquence est supérieure à 275 GHz sont facilement absorbés par les molécules polaires comme l'eau ou l'oxygène, et des molécules différentes ont des spectres d'absorption différents. En utilisant ces raies spectrales et des techniques d'imagerie, il est possible de diagnostiquer les lésions précoces dues au cancer de la peau ou d'autres lésions qui touchent les tissus superficiels. En chirurgie, les systèmes d'imagerie en ondes térahertz sont souvent utilisés afin de contrôler l'excision des cancers en temps réel. Cette méthode permet de réaliser une imagerie des tissus mous plus claire que l'imagerie ultrasonore. En outre, le système de spectroscopie à dimension temporelle térahertz (THz-TDS) peut être utilisée dans l'étude des macromolécules organiques dont le niveau d'énergie de vibration ou les niveaux rotationnels se situent dans le domaine des térahertz, en vue d'orienter la production de médicaments et la recherche médicale.

5) Application dans le domaine des communications hertziennes

La gamme au-dessus de 275 GHz se situe à la frontière entre l'optique et l'électronique. Elle possède à la fois des caractéristiques des communications hyperfréquences et des communications par ondes lumineuses, tout en ayant des caractéristiques propres. Tout d'abord, en raison du développement rapide des communications, il est difficile de satisfaire les besoins de communications hertziennes large bande à haut débit à l'aide des communications hyperfréquences classiques, alors que la gamme des ondes térahertz, qui permet de transmettre des données à haut débit et offre une grande largeur de bande disponible, pourrait devenir le principal support des communications hertziennes de demain. Par ailleurs, les ondes lumineuses subissent un affaiblissement de propagation important dans la poussière, les murs, le plastique, le tissu et autres substances non métalliques et non polaires. Les ondes térahertz peuvent pénétrer ces substances moyennant un affaiblissement faible, ce qui leur confère une grande capacité de pénétration dans les environnements difficiles. Cependant, la gamme au-dessus de 275 GHz présente également des inconvénients, dont le plus dommageable est la facilité avec laquelle elle peut être absorbée par les molécules polaires dans l'atmosphère, ce qui se traduit

par un affaiblissement atmosphérique relativement important, notamment par temps de pluie. Eu égard à ces caractéristiques, il a été décidé que cette gamme servirait principalement aux futures communications interplanétaires, aux communications mobiles large bande à courte portée et au sol, ainsi qu'aux communications dans les environnements difficiles, par exemple dans des conditions climatiques sèches et fumeuses ou sur les champs de bataille.

6) Application aux radars

Les ondes térahertz offrent des perspectives d'application aux radars, à la reconnaissance de cibles, au guidage de précision et aux fusées. En tirant parti de la bonne directivité et de la concentration énergétique des ondes térahertz, il est possible de mettre au point des radars à haute résolution et des radars de poursuite à faible angle d'élévation. La possibilité d'effectuer des imageries à travers les matériaux peut être utilisée afin de détecter les objets cachés sous un abri ou par la fumée. Le niveau peu élevé des affaiblissements dus au brouillard et à la fumée devrait permettre de créer un système de navigation capable de fonctionner par tous les temps et rendre possible l'atterrissage guidé des aéronefs par temps de brouillard. Enfin, la bande des ondes térahertz est large comparativement aux autres bandes d'ondes. Elle offre par exemple une gamme de fréquences plus large que la bande utilisée aujourd'hui pour les technologies furtives, de sorte qu'un radar ultra-large bande qui utiliserait les ondes térahertz comme source de rayonnement serait capable de capturer l'image d'aéronefs furtifs.

3 Informations réglementaires

A la CMR-12, le Règlement des radiocommunications a été modifié de sorte que des bandes de fréquences au-dessus de 275 GHz ont été identifiées pour être utilisées par les administrations pour les applications des services passifs, tels que le service de radioastronomie, le service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et le service de recherche spatiale (passive). Le numéro **5.565** du RR (édition de 2012) est reproduit ci-après:

275-3 000 GHz

Attribution aux services		
Région 1	Région 2	Région 3
275-3 000	(Non attribuée) MOD 5.565	

5.565 Les bandes de fréquences suivantes dans la gamme 275-1 000 GHz sont identifiées pour être utilisées par les administrations pour les applications des services passifs:

- service de radioastronomie: 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426-442 GHz, 453-510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz et 926-945 GHz;
- service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et service de recherche spatiale (passive): 275-286 GHz, 296-306 GHz, 313-356 GHz, 361-365 GHz, 369-392 GHz, 397-399 GHz, 409-411 GHz, 416-434 GHz, 439-467 GHz, 477-502 GHz, 523-527 GHz, 538-581 GHz, 611-630 GHz, 634-654 GHz, 657-692 GHz, 713-718 GHz, 729-733 GHz, 750-754 GHz, 771-776 GHz, 823-846 GHz, 850-854 GHz, 857-862 GHz, 866-882 GHz, 905-928 GHz, 951-956 GHz, 968-973 GHz et 985-990 GHz.

L'utilisation de la gamme de fréquences 275-1 000 GHz par les services passifs n'exclut pas l'utilisation de cette gamme de fréquences par les services actifs. Les administrations souhaitant mettre à disposition des fréquences dans la gamme 275-1 000 GHz pour les applications des services actifs sont instamment priées de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour protéger

ces services passifs contre les brouillages préjudiciables jusqu'à la date d'établissement du Tableau d'attribution des bandes de fréquences pour la gamme de fréquences 275-1 000 GHz susmentionnée.

Toutes les fréquences de la gamme 1 000-3 000 GHz peuvent être utilisées à la fois par les services actifs et les services passifs. (CMR-12)

4 Communications hertziennes térahertz

Les systèmes de communication hertziens ultra-large bande qui utilisent la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz font l'objet de nombreuses activités de recherche, dont certaines visent à concevoir des systèmes de communication hertziens à ultra-haut débit capables de faire l'interface entre l'Ethernet à 40 Gbit/s et l'Ethernet à 100 Gbit/s.

Les liaisons de communication qui utilisent les technologies térahertz, dotées d'une grande capacité de transmission mais soumises à un affaiblissement de propagation important, peuvent servir de liaisons d'accès au dernier kilomètre. Les organismes de recherche et développement ont réalisé plusieurs essais en utilisant des fréquences au-dessus de 275 GHz.

4.1 Cas d'utilisation possibles des systèmes de communication térahertz

Lors de l'étude des cas d'utilisation des communications térahertz, il convient de prendre en compte les points précis suivants:

- Utilisation d'une bande de fréquences ultra-large.
- Possibilité de miniaturiser les antennes et les dispositifs.
- Haute directivité et affaiblissement de propagation en espace libre élevé (la longueur d'onde est plus de cinq fois plus courte que dans la bande des 60 GHz, et bien que l'affaiblissement de propagation en espace libre soit au moins 25 fois plus important, il est compensé par des gains d'antenne élevés).
- Mise au point de technologies de fabrication, notamment en ce qui concerne les oscillateurs, les amplificateurs de puissance et les antennes à orientation de faisceau.

4.1.1 Communications de super-proximité entre puces et entre cartes de circuits imprimés

La Figure 2 présente un cas d'utilisation des ondes térahertz pour les communications de super-proximité entre puces et entre cartes de circuits imprimés. Le fait d'établir une connexion hertzienne entre les composants et entre les cartes de circuits imprimés devrait permettre d'éliminer le câblage et de miniaturiser les substrats et les dispositifs.

Le Tableau 1 décrit les exigences types relatives à ce cas d'utilisation. Comme cela est résumé dans ce tableau, les distances de communication lors de la mise en oeuvre de circuits intégrés et/ou la pose de substrats pour circuits intégrés dans le même boîtier devraient varier de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres.

S'agissant de la vitesse de transmission, un débit de 10 Gbit/s a déjà été prescrit pour la norme USB3.1, alors que pour la norme PCIExpress 4.0, le débit de transfert pour la couche liaison de données a été normalisé à 4 GB/s, soit 32 Gbit/s (bidirectionnel), avec possibilité de monter jusqu'à 4 GB/s × 64, soit 256 GB/s (2 Tbps), de sorte que jusqu'à 64 voies ont été spécifiées au total.

Même s'il n'est pas toujours nécessaire de prendre en charge des débits supérieurs au Tbps, les communications par ondes térahertz entre puces et entre cartes de circuits imprimés nécessiteront un ultra-haut débit de transmission s'élevant au moins à quelques dizaines de Gbit/s.

Concernant l'environnement de propagation, il convient de s'intéresser à la fois aux communications en visibilité directe (LoS) et sans visibilité directe (NLoS), dans le contexte d'un modèle de proximité

ou d'une super-proximité à l'intérieur d'un boîtier supposé métallique qui crée des ondes de réflexion importantes. Il convient de tenir compte des incidences des trajets multiples entre dispositifs situés dans un rapport de super-proximité, et des trajets multiples via les parois internes des boîtiers des dispositifs dus à la pénétration des ondes térahertz à travers les substrats.

FIGURE 2

Cas d'utilisation pour les communications de super-proximité entre puces et entre cartes de circuits imprimés

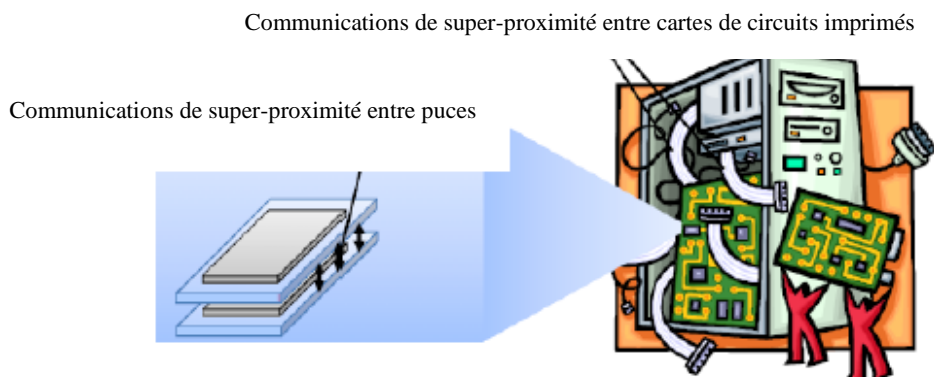


TABLEAU 1

Exigences types

Distance de communication	De quelques mm à quelques cm (super-proximité à proximité)
Débit de données	Quelques dizaines de Gbit/s
Environnement de propagation	Super-proximité à l'intérieur de boîtiers et modèle de proximité (LoS/NLoS)
Rapport BER requis	10^{-9}

4.1.2 Synchronisation de contenus avec le nuage au moyen des communications en champ proche

La Figure 3 présente un cas d'utilisation des ondes térahertz pour la synchronisation de contenus avec le nuage à l'aide des communications en champ proche. Les services dans le nuage ont connu ces derniers temps une croissance rapide, de même que les services qui assurent la synchronisation entre les smartphones, dont le nombre augmente lui aussi rapidement, et le nuage.

Le stockage dans le nuage est un service dans le nuage qui permet de stocker, par l'intermédiaire d'un réseau, des photos et des vidéos qui se trouvent dans le smartphone d'un utilisateur, sans que celui-ci ne se rende compte de ce processus de synchronisation. Cependant, les communications par paquets qui utilisent les technologies 3G et la LTE prises en charge par les smartphones pour synchroniser fréquemment les contenus sans que l'utilisateur ne s'en rende compte, conduisent à des augmentations inattendues de l'utilisation de la batterie.

Dans ce cas d'utilisation, on suppose que les portillons automatiques des gares sont équipés d'une fonction de chargement par circuit intégré, et que les utilisateurs ont accès à des smartphones munis d'une fonction de communication par ondes térahertz. Lors du passage au portillon automatique d'une gare sur le chemin du travail ou de l'école, la synchronisation simultanée des contenus au moyen des communications térahertz permettra d'éviter de consommer l'énergie de la batterie des smartphones.

Le Tableau 2 décrit les exigences types en ce qui concerne ce cas d'utilisation. Même si la distance de communication est d'à peine quelques centimètres, en vue de synchroniser un volume effectif de données ou de contenus pendant une période très courte de l'ordre d'une seconde, il est souhaitable de faire en sorte que la communication soit la plus rapide possible. Pour y parvenir, il faudra non seulement tenir compte de la vitesse de communication elle-même, mais aussi mettre au point un système d'authentification et d'association qui permette d'établir la liaison de communication en un temps très court. Par ailleurs, même si les communications térahertz en champ proche peuvent atteindre un débit supérieur à 100 Gbit/s, il est nécessaire de déterminer si la vitesse de lecture et d'écriture du système de stockage qui équipe les smartphones considérés dans ce cas d'utilisation, est compatible avec des transmissions d'un débit aussi élevé. A titre d'exemple, la vitesse de lecture et d'écriture du SSD (*Solid State Disc*), déclaré comme étant actuellement le système le plus rapide au monde, est d'environ 500 MB/s (4 Gbit/s).

On suppose en outre que l'environnement de propagation est un modèle de proximité entre dispositifs qui s'applique uniquement à la visibilité directe (LoS). Il convient d'étudier les incidences que les réflexions par trajets multiples entre dispositifs proches les uns des autres pourraient avoir sur les besoins de transferts de données.

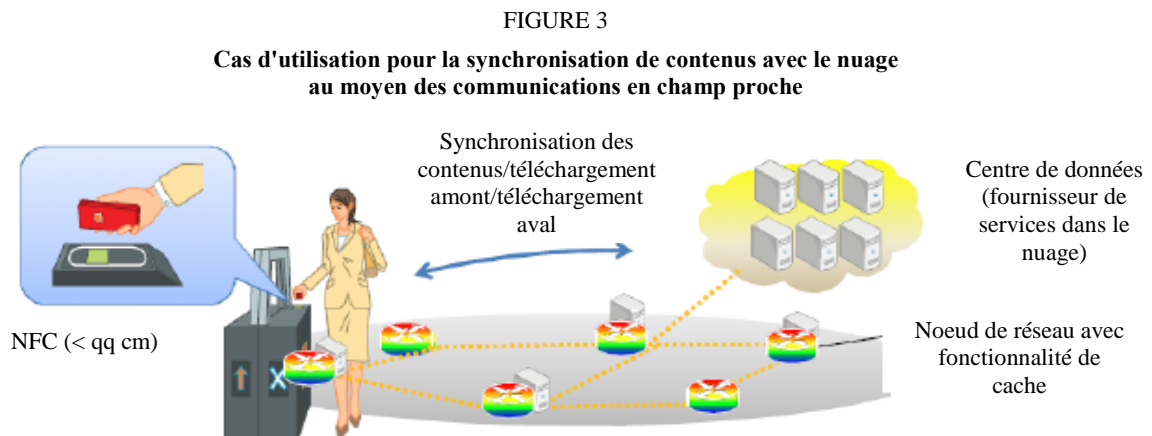


TABLEAU 2

Exigences types

Distance de communication	Jusqu'à quelques cm (proximité)
Débit de données	4 Gbit/s – quelques dizaines de Gbit/s
Environnement de propagation	Modèle de proximité entre dispositifs (LoS)
Rapport BER requis	10^{-12}

4.1.3 Communications hertziennes entre serveurs dans un centre de données

La Figure 4 présente un cas d'utilisation des ondes térahertz pour les communications entre serveurs dans un centre de données. Ces derniers temps, les services dans le nuage connaissent une croissance rapide, ce qui a pour effet d'accélérer la construction de centre de données. En général, les centres de données abritent plusieurs armoires de serveurs, dans lesquelles sont placés différents serveurs, y compris des serveurs de stockage, ainsi que de nombreux commutateurs. Il est préférable d'utiliser des connexions hertziennes pour relier les serveurs à l'intérieur des armoires de serveurs ainsi que les armoires entre elles.

Le Tableau 3 décrit les exigences types pour ce cas d'utilisation. Les distances de communication varient de quelques centimètres, s'agissant de la connexion entre des serveurs rangés verticalement à l'intérieur d'une armoire de serveurs, à quelques mètres, s'agissant de la connexion entre les armoires.

En ce qui concerne l'environnement de propagation, il est nécessaire de considérer à la fois la visibilité directe (LoS) et l'absence de visibilité directe (NLoS), dans le contexte d'un modèle de bureau où sont utilisés des matériaux de construction qui présentent un niveau de perméabilité relativement faible (haute réflexivité). Toutefois, si l'on envisage un cas particulier dans lequel l'armoire de serveur se trouve à proximité de la surface du mur et les connexions par câble entre les panneaux arrière sont remplacées par des liaisons de communication par ondes térahertz, il est possible d'appliquer un modèle à deux rayons entre les panneaux arrière.

FIGURE 4

Communications hertziennes entre serveurs dans un centre de données



TABLEAU 3

Exigences types

Distance de communication	Quelques cm – quelques m (proximité)
Débit de données	Quelques dizaines de Gbit/s – quelques centaines de Gbit/s
Environnement de propagation	Modèle de bureau/modèle à deux ondes (LoS/NLoS)
Rapport BER requis	10^{-12}

4.1.4 Liaisons *backhaul* et *fronthaul* par voie hertzienne

Une liaison *backhaul* est une connexion entre la station de base et un élément du réseau qui occupe une position plus centrale, tandis qu'une liaison *fronthaul* est une connexion entre le dispositif de commande des équipements de la station de base et la tête radio distante (unité radioélectrique). Les évolutions futures, par exemple le déploiement à très grande échelle de petites cellules et la mise en oeuvre de transmissions multipoints coordonnées (CoMP) et/ou de réseaux d'accès radio en nuage (C-RAN) pourraient faire augmenter les débits de données nécessaires pour les liaisons *backhaul* et/ou *fronthaul*. L'utilisation de connexions hertziennes pour établir ces liaisons pourraient constituer une solution intéressante lorsque la fibre optique n'est pas disponible.

Dans les cas où le débit nécessaire s'élève à plusieurs dizaines de Gbit/s, la gamme des ondes térahertz peut être considérée comme une solution intéressante. Lors de la démonstration décrite dans [1], un débit de données de 24 Gbit/s a été atteint sur une distance de liaison de 1 km.

TABLEAU 4
Exigences types

Distance de communication	500 m à 1 km
Débit de données	Jusqu'à 100 Gbit/s
Environnement de propagation	Extérieur
Rapport BER requis	Non indiqué

4.1.5 Réseaux locaux hertziens en ondes térahertz (THz WLAN)

La Figure 5 décrit un cas d'utilisation des ondes térahertz pour les réseaux locaux hertziens (WLAN). Dans le contexte du développement des communications hertziennes, les réseaux WLAN jouent un rôle de plus en plus important dans le quotidien des personnes, en leur permettant de s'affranchir de la contrainte des fils. A l'instar de l'Internet et des réseaux mobiles, les réseaux WLAN sont devenus aujourd'hui un important moyen de transmission des informations, et sont largement utilisés dans les aéroports, les bureaux, les restaurants, les habitations, etc. La gamme des ondes térahertz comprend des fréquences d'un ordre de grandeur 1 à 4 fois supérieur à celui des ondes hyperfréquences et peut assurer des débits de données de 10 Gbits/s. Les réseaux WLAN en ondes térahertz, compte tenu de leurs caractéristiques – haut débit, grande largeur de bande, structure compacte, petite taille, rayonnements peu dommageables et protection élevée contre les brouillages – pourraient être utilisés pour des applications commerciales et militaires, tels que les futurs visiophones de haute qualité, la visio-conférence, les jeux en 3D temps réel, etc.

FIGURE 5

Cas d'utilisation pour les réseaux WLAN en ondes térahertz

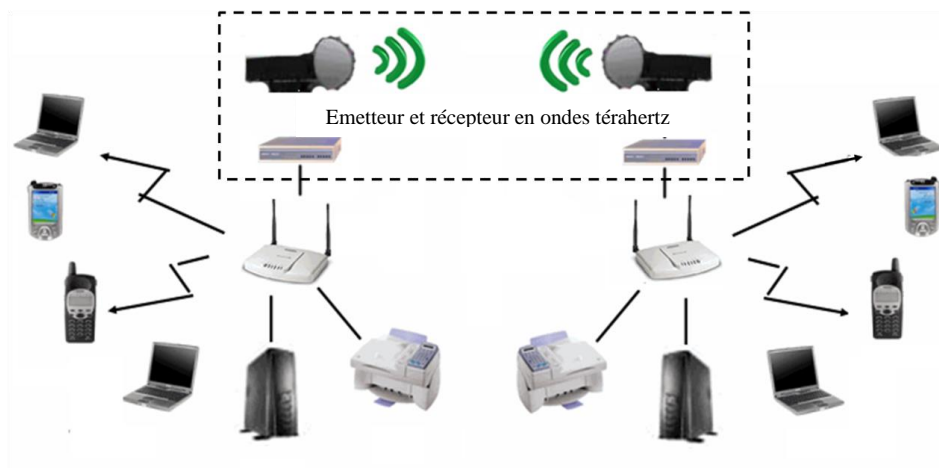


TABLEAU 5
Exigences types

Distance de communication	Quelques dizaines de mètres
Débit de données	Quelques Mbit/s à quelques dizaines de Mbit/s
Environnement de propagation	Bureaux, aéroports, restaurants
Rapport BER requis	$\leq 1 \times 10^{-6}$

4.2 Emetteurs-récepteurs en ondes térahertz

4.2.1 Emetteurs-récepteurs à 300 GHz utilisant la technologie MMIC

La Figure 6 présente un schéma de blocs de la structure d'ensemble d'un module émetteur. Une antenne à cornet diagonal, un amplificateur de puissance, un modulateur et un multiplicateur sont montés dans le boîtier de guide d'ondes métallique. Une porteuse à 75 GHz produite par un oscillateur local est reçue à l'entrée du multiplicateur, et les signaux à 20 GHz sont transmis au modulateur. Un système d'évaluation du module émetteur est mis en place en installant un module récepteur, qui est constitué d'une antenne à cornet classique (24 dBi) et d'un module de guide d'ondes muni d'une diode Schottky. La Figure 7 présente le spectre d'un signal de 20 Gbit/s à modulation d'amplitude (300 GHz) mesuré à la sortie de l'amplificateur de puissance. La Figure 8 présente le spectre d'un signal de modulation de fréquence centrale 300 GHz (± 20 GHz) mesuré à la sortie du modulateur.

FIGURE 6

Schéma de blocs d'un module émetteur

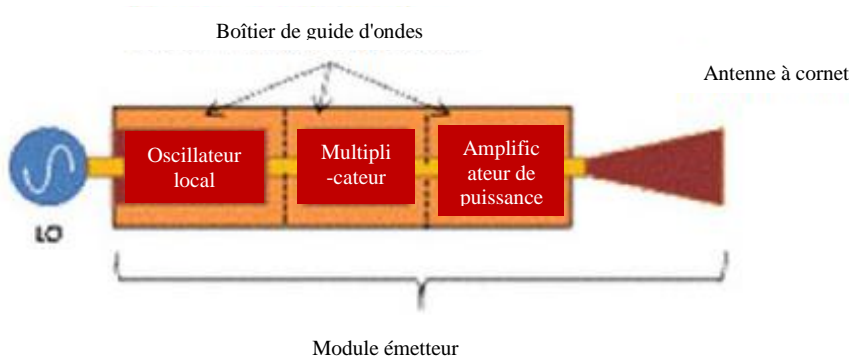


FIGURE 7

Diagramme en oeil d'un signal de 20 Gbit/s à la sortie du module émetteur

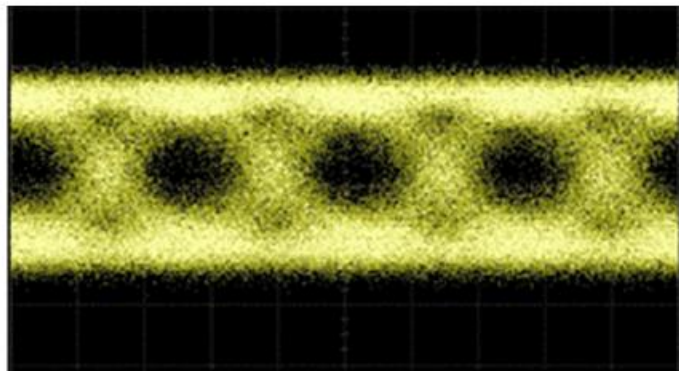
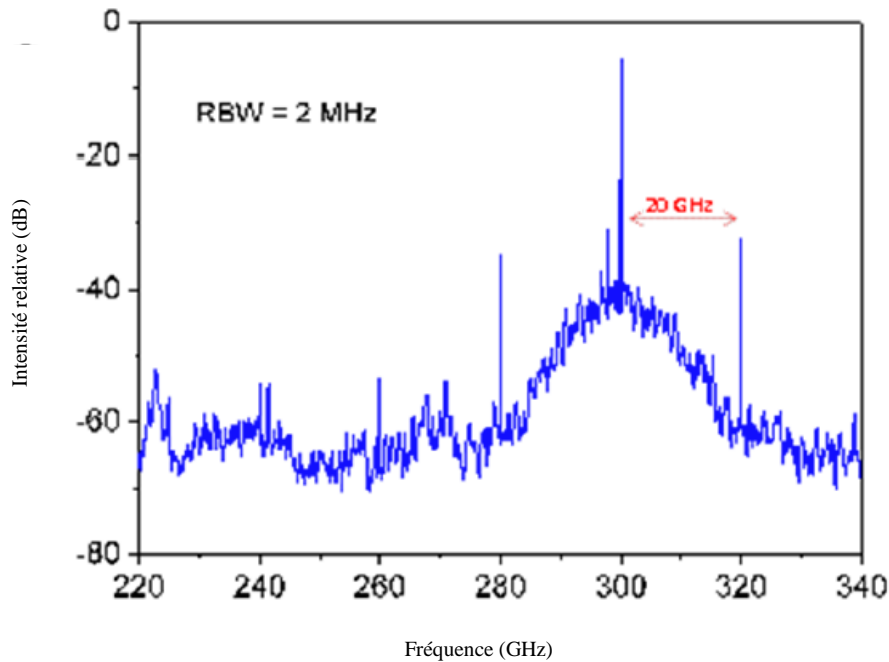


FIGURE 8

Spectre de sortie de l'amplificateur de puissance



Une autre approche basée sur la technologie MMIC est décrite dans [1], où figure la présentation d'un émetteur sous-harmonique en quadrature fonctionnant à 240 GHz. Sont également décrites dans [1] les caractéristiques de cet émetteur. Bien que la porteuse produite dans ce modèle soit de fréquence inférieure à 275 GHz, les informations disponibles donnent des indications sur les caractéristiques des émetteurs-récepteurs appelés à fonctionner dans la partie inférieure de la gamme des térahertz.

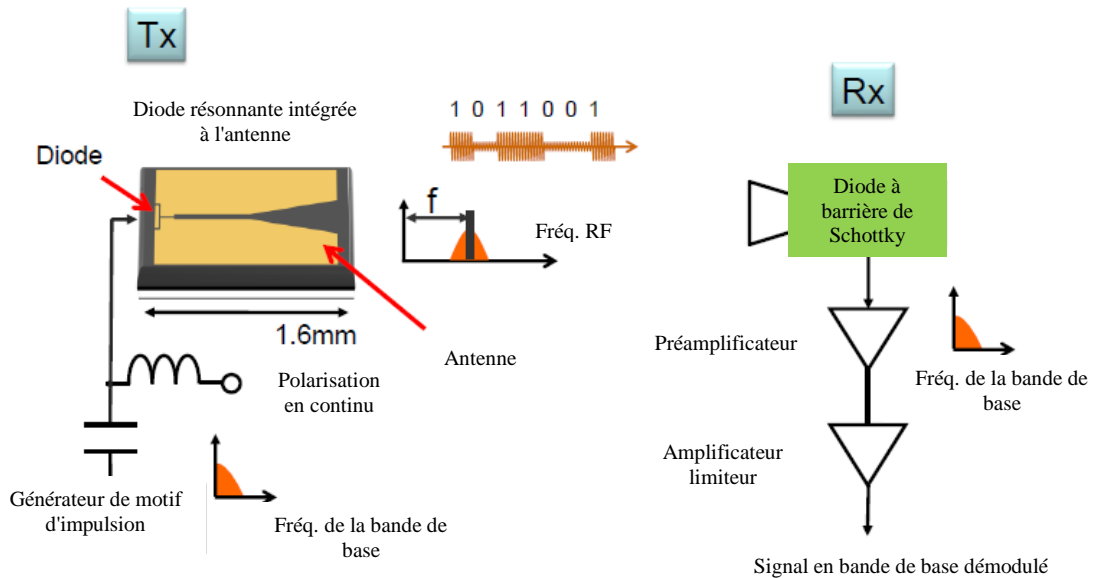
Dans [2] figure la présentation d'un système de communication hertzienne fonctionnant à 237,5 GHz et capable d'assurer un débit de données de 100 Gbit/s sur une distance de 20 m. La technologie utilisée au niveau du récepteur est la même que dans [1], tandis qu'au niveau de l'émetteur, une approche photonique est mise en oeuvre au moyen d'une photodiode à transport unipolaire, à partir de laquelle le signal de sortie est rayonné par une antenne à focalisation de faisceau.

4.2.2 Emetteur-récepteur à 300 GHz avec diode RTD

L'oscillateur utilisé est la diode dite à effet tunnel résonnant (RTD), qui oscille à une tension de polarisation continue appropriée. En faisant varier la tension de polarisation, un signal de porteuse de 300 GHz est modulé en tout ou rien en fonction de l'amplitude de la tension de polarisation. Un récepteur de détection directe est utilisé du côté de la réception, comme indiqué dans la Fig. 9. Un débit binaire maximal de 1,5 Gbit/s a été atteint, et la transmission de signaux HDTV non comprimés a été réussie au moyen de technologies de diode. Il a en outre été démontré que la diode RTD pouvait aussi être utilisée en tant que détecteur de haute sensibilité. Une transmission sans erreur de 2,5 Gbit/s à 625 GHz a par ailleurs été effectuée en utilisant un multiplicateur de fréquences pour l'émetteur.

FIGURE 9

Schéma de blocs de la liaison hertzienne utilisant des technologies de diode

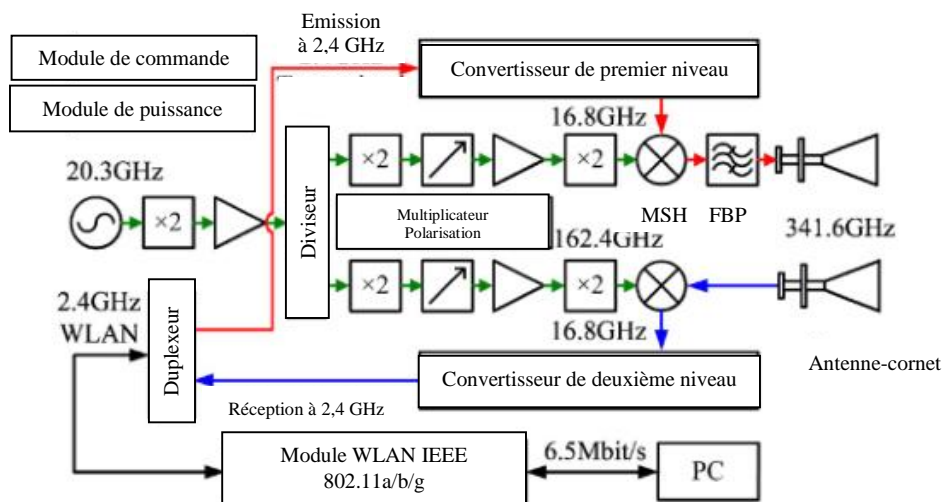


4.2.3 Réseau WLAN à 0,34 THz basé sur la norme IEEE 802.11

La Figure 10 présente de manière schématique la structure d'un réseau WLAN à 0,34 THz réalisé à l'aide d'un émetteur-récepteur à 0,34 THz dont l'extrémité utilise l'électronique transistorisée et d'un dispositif WLAN basé sur la norme IEEE 802.11. Le réseau WLAN à 0,34 THz permet d'assurer un débit de données de 6,536 Mbit/s sur une distance de 50 m et son rapport d'erreur sur les bits est inférieur à 10^{-6} . La couche MAC et la couche physique partielle sont élaborées à l'aide d'un module hertzien commercial basé sur la norme IEEE 802.11, qui fonctionne à 2,4 GHz et assure un débit de 150 Mbit/s. La porteuse à 2,4 GHz basée sur la norme IEEE 802.11 peut être translatée à 16,8 GHz au moyen d'un mélangeur. Le signal de porteuse à 16,8 GHz est reçu à l'extrémité de l'émetteur-récepteur à 0,34 THz et translaté à 0,34 THz, puis le signal à 0,34 THz est émis par l'antenne. Si un signal est reçu par l'extrémité de l'émetteur-récepteur à 0,34 THz, il est converti à 2,4 GHz et envoyé au dispositif hertzien basé sur la norme IEEE 802.11.

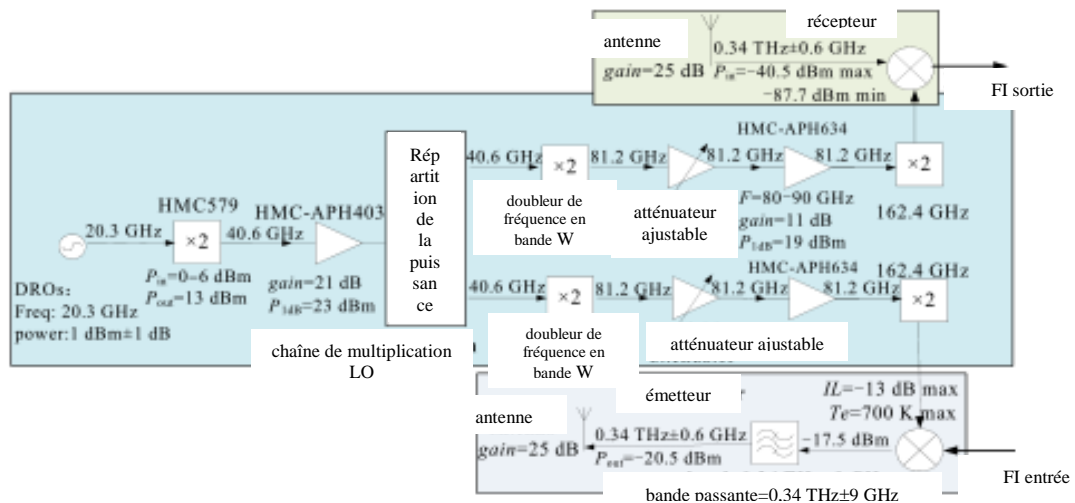
FIGURE 10

Schéma d'un noeud WLAN à 0,34 THz



La Figure 11 représente l'extrémité frontale de l'émetteur-récepteur à 0,34 THz, qui comprend un filtre à cavité à 0,34 THz, un mélangeur harmonique à 0,34 THz, une chaîne de doublage de fréquence à 0,17 THz et un circuit d'alimentation de polarisation. Le mélangeur harmonique à 0,34 THz est le module le plus important de l'extrémité frontale de l'émetteur-récepteur. Son fonctionnement est basé sur un effet tension-courant (I-V) non linéaire par diode de Schottky en antiparallèle. La chaîne de doublage de fréquence à 0,17 THz, qui comprend huit structures harmoniques, fournit un signal de vibration à 0,34 THz au mélangeur harmonique, qui comprend un doubleur de fréquences en bande Q, un amplificateur en bande Q, un diviseur de puissance en bande Q, un doubleur de fréquences en bande W, un atténuateur ajustable en bande W, un amplificateur en bande W, un doubleur de fréquences en bande G, etc. Il comporte aussi un circuit de doublage de fréquence d'ordre trois et un amplificateur pilote d'ordre deux.

FIGURE 11
Extrémité de l'émetteur-récepteur du réseau WLAN à 0,34 THz



5 Détection et imagerie

Les ondes térahertz présentent une perméabilité modérée aux substances ainsi qu'une bonne résolution spatiale. Elles offrent en outre des caractéristiques uniques dont sont dépourvues les autres bandes de fréquences électromagnétiques, telles que l'empreinte digitale spectrale des réactifs, la différenciation entre l'ADN simple brin et l'ADN double brin, la différence d'absorption dans l'eau et dans la glace et la sensibilité aux impuretés des semi-conducteurs. De plus, les ondes térahertz sont sans danger pour le corps humain. Compte tenu de ces propriétés, les ondes térahertz devraient avoir un grand nombre d'applications dans les domaines de la détection et de l'imagerie.

5.1 Méthodes de génération d'ondes térahertz

Le Tableau 6 présente de manière synthétique la relation entre différentes méthodes de génération d'ondes térahertz et les technologies correspondantes.

TABLEAU 6

Méthodes de génération d'ondes térahertz et technologies correspondantes

Méthode de génération	Technologie de génération	Matériau	Fonction
Photo-excitation par pulsations ultra-courtes	Antenne photoconductrice	LT-GaAs	THz-TDS Fonctionnement à température ambiante
Optique non linéaire	Paramétrique DFG	GaAs, GaP, GaSe, ZGP, PPLN, BD-GaAs, OP-GaAs	Longueur d'onde variable Fonctionnement à température ambiante
Photomélangé	Photoconducteur UTC-PD	LT-GaAs InP/InGaAs	Fonctionnement à température ambiante
Laser	QCL	GaAs/AlGaAs, InGaAs-AlInAs/InP	Largeur spectrale étroite Fonctionnement à température cryogénique
Electronique transistorisée	Gunn, IMPATT, RTD Semi-conducteur composé	GaAs, InP, Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT, HEMT, mHEMT, pHENT	Longueur d'onde fixe Fonctionnement à température ambiante
Tube électronique	BWO, Gyrotron		Longueur d'onde variable Fonctionnement à température ambiante

1) Photoexcitation par pulsations ultra-courtes

Il s'agit de la méthode de génération d'ondes térahertz la plus couramment utilisée aujourd'hui. La photoexcitation d'un cristal non linéaire (NLC), d'une antenne photoconductrice (PCA), de semi-conducteurs, de super-conducteurs, etc. à l'aide d'un laser à pulsations ultra-courtes dont la durée est d'environ une femtoseconde, permet de réaliser des modulations de courant de photoconduction de l'ordre de la sous-picoseconde dans les semi-conducteurs, et une pulsation optique en ondes térahertz à large bande peut être produite à partir d'une polarisation non linéaire secondaire (rectification de la lumière) en utilisant des médias non résonnants et non linéaires. Cette méthode est largement utilisée en spectroscopie THz dans le domaine du temps (THz-TDS).

La spectroscopie THz dans le domaine du temps présente un rapport signal-bruit (rapport S/N) extrêmement élevé comparativement au spectrophotomètre infrarouge lointain à transformation de Fourier, qui utilise une source de lumière thermique classique, et s'emploie en spectroscopie et en imagerie en ondes térahertz, entre autres. Bien que la structure, la composition du cristal et la longueur d'onde du laser d'excitation devraient être choisies respectivement pour la structure de l'antenne photoconductrice, et le semi-conducteur et le cristal non linéaire, grâce aux progrès techniques récents dans le domaine des lasers à pulsations ultra-courtes et à l'utilisation d'un amplificateur régénérateur pour produire une lumière pulsée à haute énergie comme lumière d'excitation, il est possible de générer une pulsation en ondes térahertz dotée d'une intensité de champ électrique élevée.

2) Optique non linéaire

Cette méthode de génération se divise entre génération paramétrique et génération par différence de fréquence (DFG). La génération paramétrique utilise une conversion de longueur d'onde au moyen de polaritons phononiques dans des cristaux non linéaires, comme le LiNbO₃. Elle se caractérise par une longueur d'onde variable et un fonctionnement à température ambiante, et offre la possibilité de

miniaturiser la source lumineuse en la faisant passer de la taille d'un dispositif de table à celle d'un dispositif à main, ainsi que de miniaturiser les lasers d'excitation. Récemment, cette méthode a permis de générer une pulsation en ondes térahertz d'une puissance supérieure à 1 kW en valeur de crête, ce qui est comparable aux valeurs obtenues au moyen d'un laser à électrons libres (FEL).

La génération par différence de fréquence consiste à générer une fréquence différence au moyen de l'effet optique non linéaire secondaire des cristaux non linéaires. Ces dernières années, des méthodes de génération qui utilisent des cristaux organiques comme le DAST et le BNA ont été mises au point, alors qu'en termes de puissance, un niveau de l'ordre du mW a été obtenu au moyen d'une génération par différence de fréquences à intracavité.

3) Photomélangé

En injectant une lumière laser à deux longueurs d'onde dans un dispositif photoconducteur ou une photodiode, une onde térahertz est produite sous la forme d'une fréquence différentielle optique par l'intermédiaire d'une conversion photoélectrique par photomélangé. S'agissant de la photodiode, il est possible de produire une lumière térahertz dépassant 1 THz grâce aux propriétés de haut débit et de haut rendement de la photodiode à transport unipolaire (UTC-PD).

4) Laser

Le laser à cascade quantique (QCL) possède une structure feuilletée de matériaux semi-conducteurs dont les barrières d'énergie sont de hauteur variable et dont l'épaisseur est de l'ordre du nanomètre. Il réalise l'oscillation laser par transition inter-sous-bandes. Bien que la largeur spectrale soit en principe très étroite, le fonctionnement se limite dans la pratique à de basses températures (la température maximale de fonctionnement par entraînement par impulsions est de 200 K). Toutefois, la puissance produite à une fréquence supérieure à 1 THz est relativement grande.

5) Electronique transistorisée

L'électronique transistorisée est généralement mise en oeuvre sous la forme de dispositifs hyper-fréquences ou de dispositifs en ondes millimétriques. Les diodes Gunn utilisent une transition intervallée avec des bandes de conduction de masses effectives différentes, alors que les diodes à avalanche et temps de transit (IMPATT) et les diodes à effet tunnel et temps de transit (TNNETT) sont des diodes à temps de transit qui créent des zones de structure de champ élevé sur le passage des électrons.

Les diodes RTD consistent en une structure à double barrière avec un film mince de semi-conducteur et créent une résistance négative différentielle au moyen de l'effet tunnel produit, ce qui permet d'obtenir une oscillation de base supérieure à 1 THz (même si la puissance est faible).

Le transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) est un dispositif semi-conducteur à haute fréquence de type pratique, actuellement utilisé dans les oscillateurs, les amplificateurs, et même dans les circuits monolithiques intégrés hyperfréquences (MMIC), qui utilise les semi-conducteurs composés et le transistor à haute mobilité d'électrons (HEMT). Alors que les semi-conducteurs de type InP dotés de propriétés matérielles telles qu'une haute mobilité d'électrons devraient fonctionner à plus grande vitesse, on relève en outre l'existence de dispositifs qui fonctionnent à plus de quelque centaines de GHz à l'aide de technologies telles que le transistor pHEMT (HEMT pseudomorphique) et le transistor mHEMT (HEMT métamorphique), qui visent à atteindre des vitesses plus élevées.

6) Tube à électrons

Les ondes THz sont générées par l'oscillateur à ondes régressives (BWO) à partir d'une interaction entre le circuit à onde lente et les électrons; par le rayonnement de Smith-Purcell lié à l'effet de Smith-Purcell, qui intervient lors du passage des électrons au-dessus d'un réseau de diffraction métallique; et par le gyrotron à partir de l'action du maser à résonance cyclotron, dans laquelle interviennent des modifications de la masse des électrons dues à l'effet relativiste. Si la puissance produite à l'aide de cette méthode est généralement élevée, les dimensions des dispositifs utilisés le sont également.

5.2 Caméras térahertz

La présente section décrit les orientations relatives au capteur à barrettes térahertz bidimensionnel, qui utilise une technologie de capteur à barrettes infrarouge non refroidi de type bolomètre.

La Figure 12 représente une caméra infrarouge munie d'un capteur à barrettes infrarouge à deux dimensions dont la résolution est de 320×240 pour un espacement des pixels de $23,5 \mu\text{m}$, lors de l'injection d'un laser à cascade quantique (QCL) qui oscille à 3,1 THz. Dans ce cas, la structure des pixels possède une couche supplémentaire pour l'absorption des ondes térahertz, et par un ajustement de la résistance de la couche de film mince à partir d'une impédance du vide équivalente à 377Ω , il est possible d'améliorer la sensibilité au voisinage de 3 THz d'environ un chiffre (voir la Figure 13(a)). En outre, le capteur à barrettes térahertz à bande étroite représenté dans la Figure 13 (b) a été mis au point afin d'obtenir une amélioration supplémentaire de la sensibilité d'un facteur 2 à 4 pour certaines longueurs d'onde seulement.

La Figure 14 présente les variations de la puissance équivalente de bruit (NEP) des capteurs à barrettes térahertz à large bande et à bande étroite en fonction de la longueur d'onde. On constate que la NEP du capteur à barrettes térahertz à large bande est à peu près plate pour des longueurs d'onde comprises entre $3 \mu\text{m}$ et un peu moins de $200 \mu\text{m}$, et qu'elle commence à se dégrader à partir du moment où la longueur d'onde dépasse $200 \mu\text{m}$. La Figure 15 et le Tableau 7 présentent respectivement une vue externe et les spécifications d'une caméra térahertz à main munie de l'un des deux types de capteurs à barrettes, à savoir le capteur à barrettes en ondes térahertz à large bande. La lentille térahertz est constituée de silicone à haute résistivité et recouverte d'un film de parylène qui sert de revêtement non réfléchissant. En outre, un filtre d'arrêt infrarouge (filtre à treillis métallique qui laisse passer les rayonnements de longueur d'onde supérieure à $30 \mu\text{m}$ environ) est fixé devant la lentille térahertz. Cette caméra peut être commandée depuis un ordinateur à l'aide d'une interface USB 2.0 et peut envoyer des données numériques de création d'images à un ordinateur.

FIGURE 12 (A)

Capteur à barrettes térahertz à large bande

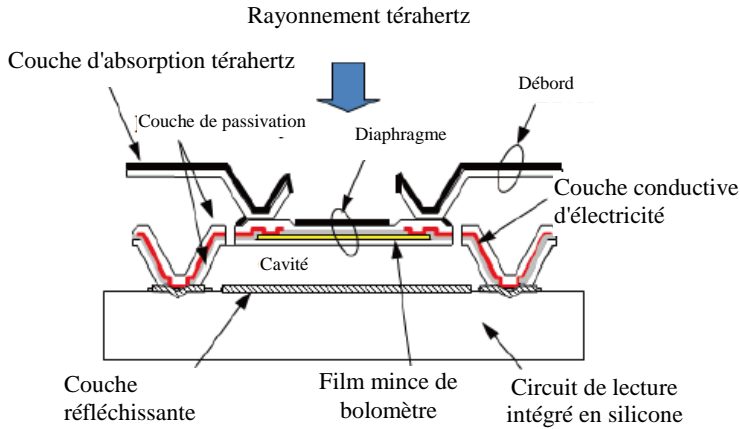


FIGURE 12 (B)

Capteur à barrettes térahertz à bande étroite

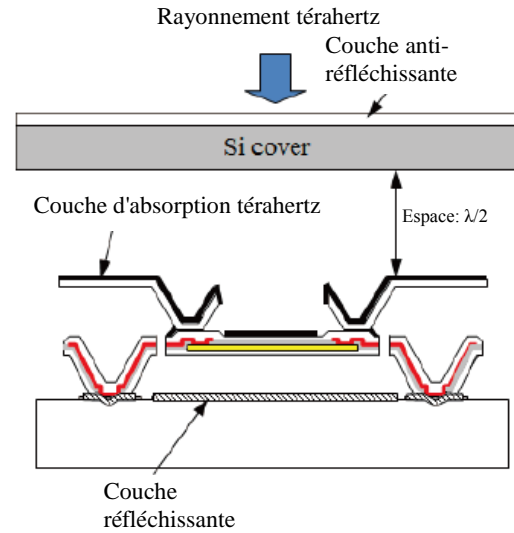


FIGURE 13

Diagramme de faisceau laser à cascade quantique d'un capteur à barrettes térahertz d'une résolution de 320x240 avec un espacement des pixels de 23,5 μm

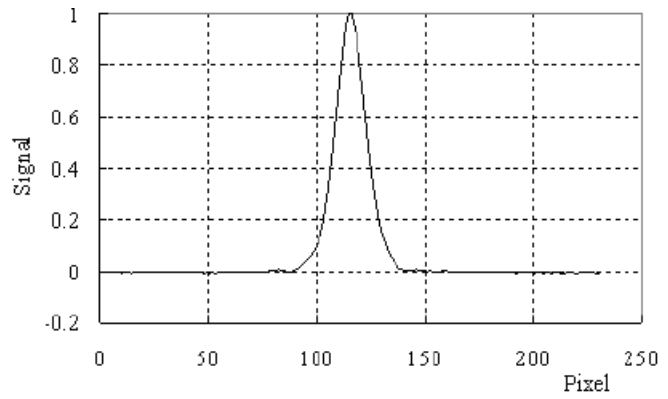
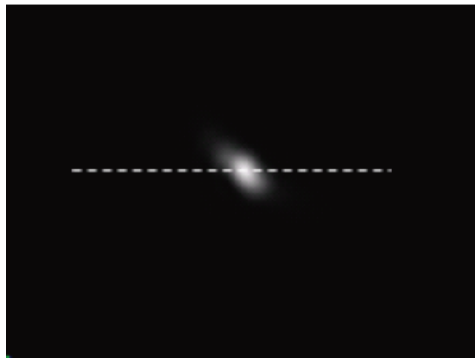


FIGURE 14

Variations de la NEP d'un capteur à barrettes térahertz en fonction de la longueur d'onde

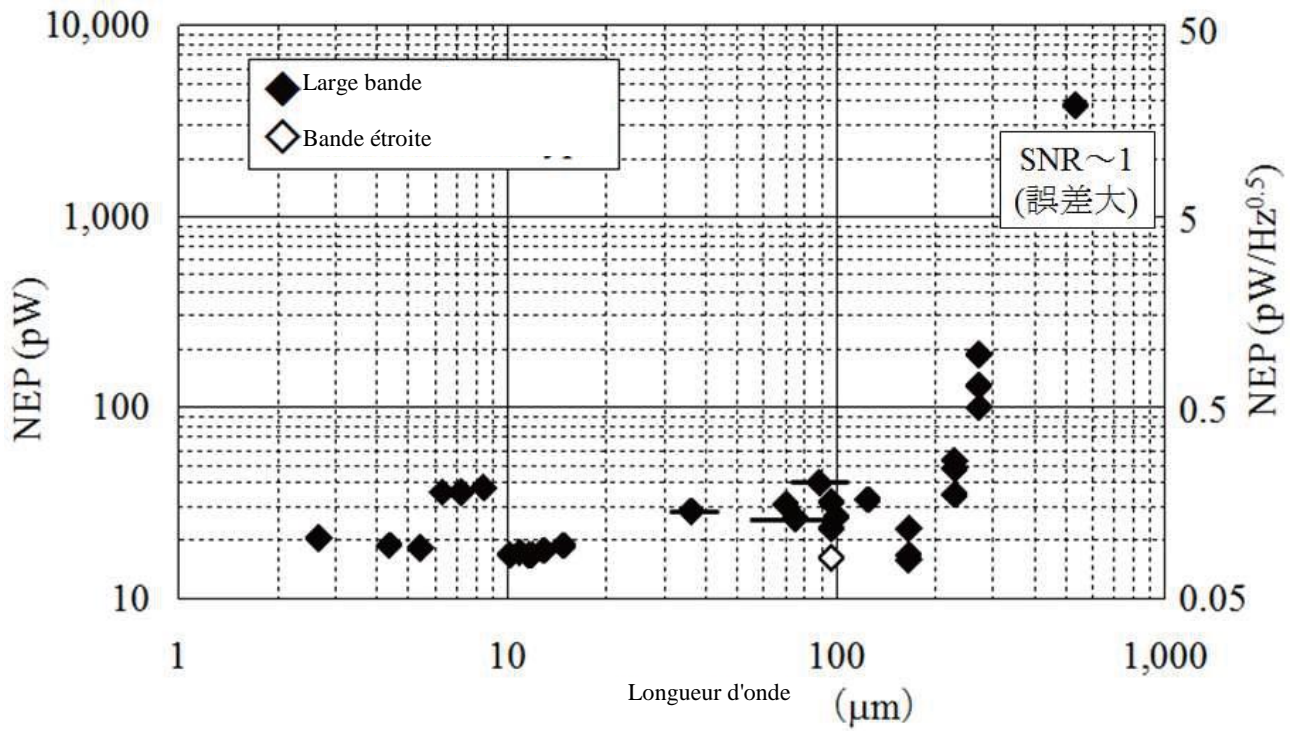


FIGURE 15

Vue extérieure d'une caméra térahertz



TABLEAU 7

Spécifications d'une caméra térahertz

Méthode	Type bolomètre
Type du capteur	Nombre de pixels: 320 × 240 Espacement des pixels: 23,5 µm
Champ visuel	Environ 15° × 11° (en cas d'utilisation d'une lentille de distance focale 28 mm)
Fréquence de trames	30 Hz
Sortie de données	Données numériques de création d'images: USB 2.0 Signal synchrone: BNC
Fonction d'imagerie par détection synchrone	Signal synchrone: 15 Hz, 7,5 Hz, 3,75 Hz, 1,875 Hz (sortie TTL: +5V)
Fonction de traitement du signal	Intégration de trame Filtrage spatial
Poids	Environ 550 g (lentille et filtre non compris)

5.3 Spectroscopie

Les systèmes de spectroscopie peuvent être répartis entre les spectromètres infrarouges classiques à transformée de Fourier (FTIR), les systèmes de spectroscopie à balayage en longueur d'onde et les systèmes de spectroscopie térahertz à domaine temporel (THz-TDS). Le système de Martin-Puplett est une extension de la technologie infrarouge classique et constitue un exemple de système FTIR. Les systèmes de spectroscopie à balayage en longueur d'onde utilisent un tube à ondes régressives pour modifier directement la longueur d'une onde térahertz, et différentes méthodes par différence de fréquence qui utilisent deux lasers de longueur d'onde variable. Des problèmes se posent toutefois concernant la précision de l'amplitude des variations et de la longueur d'onde.

5.3.1 THz-TDS (Spectroscopie térahertz à domaine temporel)

Mise au point au cours des dix dernières années, la spectroscopie à domaine temporel est un nouvel outil très efficace pour effectuer des mesures dans le domaine des ondes térahertz. Des formes d'ondes électriques à pulsation monocyclique en rayonnement térahertz sont générées et mesurées à l'aide d'un procédé de détection à déclenchement qui utilise une courte impulsion laser de spectroscopie proche infrarouge. En général, la pulsation monocyclique en rayonnement THz comprend une gamme de fréquences très large, qui s'étend typiquement de 100 GHz à 10 THz. Cette méthode est de plus en plus couramment utilisée pour l'analyse des matériaux.

5.3.2 Spectroscopie FTIR (infrarouge à transformée de Fourier)

De nombreux matériaux possèdent ce qu'on appelle une empreinte digitale spectrale dans la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz. La spectroscopie dans la gamme de fréquences des 1 000 GHz est utilisée depuis les années 60, et des produits commerciaux ont déjà été élaborés. Le système couvre entièrement la gamme de fréquences jusqu'à la gamme de l'infrarouge moyen. Dans la gamme de l'infrarouge moyen, les empreintes spectrales sont liées aux propriétés intramoléculaires, et il existe des bibliothèques spectrales de tous les produits chimiques. Les chimistes disposent ainsi d'un système commercial qui leur permet d'identifier facilement des matériaux inconnus. Dans l'infrarouge lointain, c'est-à-dire dans la gamme des ondes térahertz, les empreintes spectrales dépendent des interactions moléculaires, de l'absorption phononique, des liaisons hydrogène ou de caractéristiques moléculaires

similaires. Il n'existe pas, comme dans la gamme de l'infrarouge moyen, de bibliothèque spectrale qui fasse l'objet d'une exploitation commerciale.

5.3.3 Analyse des matériaux

La spectroscopie à domaine temporelle permet d'analyser les propriétés des solides et des liquides. La polarimétrie en ondes térahertz s'utilise, par exemple, pour évaluer les propriétés de biréfringence des matériaux à chaque fréquence. Ce type de procédé commence à être commercialisé dans l'optique de la création de nouveaux matériaux, avec la mise sur le marché de dispositifs munis de fonctions d'analyse, destinés à analyser, par exemple, les polymères et les isomères optiques. Par ailleurs, bien que l'absorption des ondes térahertz par l'eau soit très élevée, il est maintenant possible de mesurer des échantillons qui contiennent de l'eau, ce qui était habituellement considéré comme difficilement praticable, en utilisant la spectroscopie à réflexion totale atténuée (méthode ATR) à des fréquences situées dans la gamme des ondes térahertz.

Dans la mesure où la méthode ATR permet de déterminer les caractéristiques des échantillons sans pénétration dans l'eau, elle peut également être utilisée afin de détecter les cellules dans les liquides de culture, et l'on s'attend à ce qu'il en découle des applications des ondes térahertz en biotechnologie.

5.4 Essais non destructifs

5.4.1 Applications dans le domaine des produits industriels

L'imagerie térahertz continue de faire l'objet d'une très forte demande dans le secteur des produits et matériaux industriels. En effet, seuls les ondes térahertz ou des rayonnements tels que les rayons X peuvent permettre de voir à travers les objets opaques dans la lumière visible. Or l'utilisation des rayonnements ionisants, comme les rayons X, présente des risques et des contraintes, alors que les ondes térahertz ont une énergie faible en termes de quanta et ne sont pas ionisantes. De plus, les rayons X se prêtent en général difficilement à la détection des éléments légers, comme le carbone. Par ailleurs, comparativement aux ondes hyperfréquences, entre autres, qui ont en principe une longueur d'onde élevée et offrent une médiocre résolution d'image (résolution spatiale), les ondes millimétriques et les ondes térahertz, qui permettent d'obtenir une résolution spatiale de l'ordre du millimètre ou inférieure, sont beaucoup plus intéressantes dans la perspective d'une utilisation en imagerie.

Les produits industriels constitués de matériaux non métalliques qui émettent des ondes térahertz sont très présents dans nos vies quotidiennes. Certains de ces produits, parmi les plus courants, sont faits de plastique, de vinyle et de papier, alors que d'autres sont en céramique ou en caoutchouc et possèdent des fonctions diverses, et ont en général une forte valeur ajoutée. Par exemple, certains composants médicaux utilisent la résistance de la céramique à la chaleur ou la souplesse du caoutchouc. Ces produits sont largement utilisés dans le secteur de l'énergie et le secteur médical, et sont essentiels à la détection des particules étrangères. La taille des défauts est souvent au minimum de 1 μm à 10 μm , et il est nécessaire de disposer d'un rapport S/N et d'un débit élevés.

La tomodensitométrie (CT) térahertz s'annonce comme une technique d'imagerie prometteuse pour les essais non destructifs non réalisables à l'aide des rayons X. Les ondes térahertz, qui fournissent des informations spectroscopiques, peuvent être utilisées pour détecter les défauts et en déterminer la nature, et suscitent de l'intérêt en raison de la nouvelle valeur ajoutée qu'elles pourraient apporter à l'analyse. Les défauts qui doivent être détectés comprennent les particules étrangères, les inégalités des films minces, les défauts des revêtements, etc.

Le niveau de précision requis est généralement de quelques micromètres, mais pour l'inspection des substrats semi-conducteurs, entre autres, il est dans certains cas nécessaire de déterminer les propriétés électriques de films minces d'une épaisseur inférieure à quelques centaines de nanomètres.

Même si l'on pensait qu'il serait difficile de mesurer ce type de film mince à l'aide des ondes térahertz, de récents progrès techniques ont commencé à en montrer la possibilité.

5.4.2 Applications en biologie et en médecine

De nos jours, les inspections cliniques ont un vaste champ d'application, qui s'étend des maladies liées au style de vie aux marqueurs du cancer, si l'on tient compte des applications à la recherche. Parmi les principes fondamentaux utilisés, entre autres, dans la détection des protéines cibles *in vivo*, nombreux sont ceux qui s'inspirent des mécanismes de reconnaissance des organismes, par exemple la réaction antigène-anticorps.

Toutefois, pour qu'un être humain puisse déceler la présence ou l'absence de cette reconnaissance, un niveau de traitement supplémentaire est nécessaire. Par exemple, dans la méthode de détection des allergènes qui repose sur une technique d'inspection appelée enzyme-immuno-essai, un anticorps de capture qui se lie spécifiquement à l'allergène visé est attaché à un substrat, et après une réaction avec l'échantillon, l'absence ou la présence de l'allergène est déterminée à l'aide d'anticorps ou de marqueurs de détection. Dans le second cas, les résultats des tests sont indiqués au moyen de couleurs ou par fluorescence, selon un procédé qui utilise des réactions à plusieurs étapes. Ces marqueurs ont été conçus pour produire de la couleur de manière effective à la moindre réaction avec le substrat, et la sensibilité de détection atteinte dans les mesures de chimiluminescence est de l'ordre du picogramme. Toutefois, les inspections à plusieurs étapes présentent aussi des inconvénients, notamment le nombre élevé de réactifs qu'elles nécessitent et leur longue durée. Le découpage du processus en plusieurs étapes conduit en outre à une augmentation des facteurs d'erreur.

Dans ce contexte, un groupe de chercheurs allemands a indiqué en 2000 qu'il était possible d'utiliser les ondes térahertz pour réaliser des détections sans marqueur. Les expériences menées par ces chercheurs ont montré qu'il existait des différences entre l'ADN simple brin et l'ADN double brin du point de vue de l'indice de réfraction et de la transmittance dans les ondes térahertz. Par la suite, un groupe de chercheurs des Etats-Unis a proposé une méthode de détection de la liaison avidine-biotine à partir du temps de propagation de phase dans la forme d'onde temporelle de la spectroscopie térahertz à domaine temporel (THz-TDS). Ces résultats signifient qu'il est possible de détecter la présence ou l'absence de liaison sans utiliser de marqueurs, à partir des variations de l'indice de réfraction et de l'absorbance des polymères biologiques dans les bandes d'ondes térahertz. Au Japon, après qu'une ligne de composés formés de petites molécules avait été attachée à une membrane filtrante, un système de mesure par imagerie constitué d'un laser à cascade quantique et d'une caméra térahertz a permis de détecter des protéines qui se lient spécifiquement à ces composés sous forme d'images, ce qui a confirmé qu'il était possible de détecter des substances biologiques comme les protéines rapidement, de manière pratique, et sans avoir recours à des marqueurs.

Par ailleurs, la sensibilité de la détection constitue un enjeu important du point de vue de l'évolution technologique. Les inspections cliniques nécessitent une sensibilité qui s'échelonne du milligramme au picogramme, les niveaux de sensibilité du nanogramme au picogramme étant avant tout nécessaires aux inspections sans marqueur. Parmi les applications qui nécessitent un tel niveau de sensibilité, on peut citer le diagnostic prédictif des maladies auto-immunes dues à la présence d'auto-anticorps dans le sang.

En général, la protection contre les invasions de bactéries et de virus depuis le milieu extérieur se fait par l'intermédiaire d'une réponse immunitaire à l'intérieur de l'organisme. Toutefois, dans les maladies auto-immunes, des substances qui participent à l'immunité de l'organisme se retournent contre lui. Dans le cas du diabète de type 1, par exemple, des auto-anticorps dirigés contre trois types de protéines pancréatiques ont été découverts, et l'on sait que 70% à 90% des patients possèdent au moins un de ces auto-anticorps. Par ailleurs, la relation entre ces trois auto-anticorps et leur incidence a été étudiée, et des liens ont clairement été établis. Il est donc possible de prévoir l'apparition de la maladie en

menant des inspections préliminaires destinées à déterminer si ces auto-anticorps sont présents ou non dans l'organisme, et ces inspections peuvent aussi servir à des fins préventives.

Afin de pouvoir utiliser ce type d'inspection dans les examens de santé, il importe de mettre au point une technologie qui soit facile d'utilisation, rapide et bon marché. L'idéal serait de pouvoir faire des prévisions pour plusieurs maladies à la fois au cours d'une inspection, et non seulement pour le diabète de type 1 dont il est question ici. En d'autres termes, il est nécessaire de disposer d'une technologie qui permette de réaliser des inspections sans marqueur et de détecter des substances biologiques de l'ordre du picogramme, de façon à pouvoir mener des inspections simultanées en faisant réagir les auto-antigènes de plusieurs maladies fixés à une puce d'examen unique avec de faibles quantités d'auto-anticorps présents dans un échantillon de sang.

Selon une enquête de Fuji-Keizai, le marché des médicaments en phase d'essai pour les inspections à base d'immun-sérum classiques, y compris les inspections qui reposent sur la réaction antigène-anticorps, s'élevait, au niveau national, à 157,2 milliards JPY en 2008 et à 168 milliards JPY en 2013. Ces médicaments représentent plus de 40% du marché des essais pharmaceutiques, dont ils constituent le principal segment. Leur mise en vente devrait conduire à la commercialisation d'une technologie d'inspection sans marqueur de haute précision, qui favorisera l'expansion du marché.

D'une manière générale, les besoins d'inspections sans marqueur pour la détection de substances à l'état de traces sont présents dans de nombreux secteurs, et leur effet d'entraînement est grand. Ils concernent notamment le domaine de la sécurité, avec la détection des gaz dangereux, des armes bactériologiques et des explosifs; la détection des virus infectieux, par exemple pour lutter contre les nouvelles formes de grippe en cas de crainte de pandémie; et la détection de substances à l'état de traces dans l'environnement, de résidus de pesticides dans les produits agricoles et de résidus d'antibiotiques chez le bétail.

Par conséquent, il importe de continuer l'élaboration d'une technologie d'inspection sans marqueur en tant qu'infrastructure, qui en est à ses débuts, ainsi que les recherches sur la sélectivité de cette technologie vis-à-vis des substances à détecter lors des inspections, et les activités de recherche-développement destinées à améliorer la sensibilité de détection. A cet égard, une méthode qui consiste à se servir d'une maille métallique comme capteur a permis de détecter des protéines de l'ordre du nanogramme/mm à l'aide des ondes térahertz.

La fusion des technologies de détection sans marqueur de substances à l'état de trace et d'imagerie permettra d'élargir encore la gamme des utilisations. En particulier, il sera possible d'inspecter de manière exhaustive des protéines qui se lient spécifiquement à certains réseaux de petites molécules ou de chaînes de sucre, ce qui pourra être appliqué à la conception de nouveaux médicaments. En outre, la détection sans marqueur à l'aide des ondes térahertz permettra de clarifier l'existence de protéines non décelées jusqu'alors parce qu'elles ne pouvaient pas être marquées, et devrait devenir une puissante technologie de repérage pour la recherche en sciences de la vie.

6 Activités des organismes internationaux de normalisation sur les ondes térahertz

En 2008, l'IEEE 802.15 a créé le *THz Interest Group* (IG THz), qui s'est tout d'abord intéressé aux communications térahertz et aux applications réseaux connexes fonctionnant dans les bandes d'ondes térahertz entre 275 et 3 000 GHz. Ces applications prennent en charge les types de communication suivants: composant à composant, carte à carte, machine à machine, humain à machine et humain à humain. Les travaux du groupe ont confirmé que les communications térahertz utiliseraient des méthodes de modulation hertzienne relativement peu complexes et des systèmes d'antennes équidirectives et/ou directives, et offriraient des débits de transfert de données très élevés, typiquement de l'ordre de plusieurs dizaines de Gbit/s et jusqu'à 100 Gbit/s, de façon à égaler les futures capacités de la fibre optique. Le groupe a par ailleurs constaté que les systèmes de communication hertiens en

ondes térahertz pourraient assurer des transmissions sur des distances très courtes (quelques centimètres ou moins) à relativement longues (plusieurs centaines de mètres).

L'IG THz étudie les questions relatives au spectre ouvert et la modélisation des voies, et suit le développement de la technologie. Avec la mise au point de technologies d'émetteur-récepteur d'un niveau de maturité plus élevé, l'IEEE 802.15 a franchi une étape vers l'élaboration d'une nouvelle norme en créant, en juillet 2013, un groupe d'étude chargé de déterminer la validité d'une norme 100 G (100 Gbit/s sur des liaisons hertziennes point à point de 40/100 Gbit/s à faisceau commutable).

Le groupe d'étude a terminé ses travaux en mars 2014, avec la création du Groupe de travail 3d. A partir de l'IEEE 802.15.3c, ce groupe de travail élaborera un amendement pour définir une couche physique point à point commutée hertzienne pour la norme IEEE 802.15.3 fonctionnant à des débits de données PHY typiquement de l'ordre de 100 Gbit/s ou plus, avec, si nécessaire, des solutions de repli vers des débits de données plus faibles. L'exploitation est envisagée de la gamme des 60 GHz au domaine de l'optique hertzienne inclus, sur des distances de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Sont définies par ailleurs des modifications de la couche de commande d'accès au support (MAC) nécessaires à la prise en charge de cette nouvelle couche physique. Parmi les applications d'intérêt potentielles figurent les centres de données hertziens, le téléchargement en mode kiosque, les communications hertziennes à l'intérieur de dispositifs, et le *backhaul* et le *fronthaul* hertziens.

Bien que l'IG THz se soit d'abord intéressé à la gamme de fréquences au-dessus de 275 GHz, dans le cadre des travaux du Groupe de travail 3d, la gamme des fréquences à l'étude sera ouverte à d'autres bandes, par exemple la gamme des 60 GHz et l'optique en espace libre. Par conséquent, la longueur d'onde d'intérêt pour la couche PHY sera de l'ordre du millimètre ou plus courte.

L'identification de bandes de fréquences concrètes au-dessus de 275 GHz est un aspect essentiel de l'élaboration de l'amendement. L'un des paramètres clés dans la sélection de bandes de fréquences appropriées est celui des caractéristiques de l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques dans la gamme de fréquences comprise entre 100 GHz et 1 000 GHz. Il convient en effet de tenir compte de l'affaiblissement spécifique par résonance dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau. L'évaluation de la bande de fréquences contiguë utilisable pour les communications térahertz se fait simplement en évitant les raies d'affaiblissement par résonance correspondantes. Le Tableau 8 présente de manière synthétique les gammes de fréquences et largeurs de bande contiguës appropriées.

TABLEAU 8

Gammes de fréquences et largeurs de bande contiguës appropriées

Gamme de fréquences (GHz)	Largeur de bande contiguë (GHz)	Affaiblissement supplémentaire par résonance (dB/km)
200-320	120	< 10
275-320	45	< 10
335-360	25	< 10
275-370	95	< 100
380-445	65	< 100
455-525	70	< 100
625-725	100	< 100
780-910	130	< 100

Outre les caractéristiques d'affaiblissement, le niveau de maturité de la technologie joue aussi un rôle important. Compte tenu des résultats des expériences de transmission et des projets de recherche en cours, il est probable que le Groupe de travail 802.15.3d axe ses travaux sur la bande de fréquences comprise entre 275 GHz et 325 GHz.

Un appel à propositions devrait être lancé au second semestre de 2015, en vue d'achever l'élaboration de la norme au premier semestre de 2017. Par ailleurs, l'IG THz continue de suivre activement les progrès accomplis concernant les cas d'utilisation de la technologie qui ne relèvent pas des travaux du Groupe d'étude 3d, ce qui débouchera sur la création d'un ou plusieurs groupes d'étude chargés d'élaborer des normes dans la gamme de fréquences des ondes térahertz.

7 Résumé

Les caractéristiques des dispositifs et systèmes en ondes térahertz traités dans le présent Rapport s'améliorent rapidement grâce aux progrès technologiques. Les systèmes de communication en ondes térahertz, notamment, pourraient se révéler très intéressants pour assurer des débits de données proches de 100 Gbit/s, dont la vitesse est actuellement à l'étude au sein de l'IEEE802. Pour mettre ces dispositifs sur le marché dans un proche avenir, il conviendra d'étudier le partage entre services actifs et services passifs ainsi que les modifications à apporter au Règlement des radiocommunications.

8 Bibliographie

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, janvier 2014; <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf>.
 - [2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), <http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html>.
 - [3] APT/ASTAP/REPT-04 – Technology trends of telecommunications above 100 GHz.
-