



PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES OUVERTES PAR LA 5G

Pierre Henriët
Député

Gérard Longuet
Sénateur

Décembre 2018



LES RAPPORTS DE
L'OPECST



© Assemblée nationale

Pierre Henriet
Député



© Sénat

Gérard Longuet
Sénateur
Président

PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES OUVERTES PAR LA 5G

Pierre Henriet
Député

Gérard Longuet
Sénateur



© Adria Stock / gettyimages

Le déploiement de la 5G, cinquième génération de standards de téléphonie mobile, doit permettre de relever le défi de l'ultra-connectivité de nos sociétés. Il s'agit de dépasser les limites du standard actuel : réseaux engorgés dans les zones à trafic ponctuel élevé, incapacité à gérer une grande quantité d'objets connectés, délais de latence trop longs. La 5G doit conduire à des communications massives, quasiment en temps réel, grâce à l'optimisation des bandes de fréquence par des modulations numériques plus complexes et un meilleur pointage des faisceaux.

Différents enjeux technologiques ont été abordés lors d'une audition publique organisée au Sénat le 8 novembre 2018 : fonctionnement de ce standard, choix des bandes de fréquences, besoins en termes d'infrastructures, exposition des particuliers aux ondes électromagnétiques, etc.

L'Office formule, dans le présent rapport, plusieurs recommandations qui visent à permettre au monde de la recherche de pouvoir disposer de données précises émanant des opérateurs et des constructeurs d'antennes ; à garantir le financement de l'appel à projets de recherche de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) sur les risques liés à l'exposition aux radiofréquences ; à poursuivre les expérimentations 5G en cours et à lancer dès 2019 des pilotes 5G « grandeur nature » ; enfin, à conduire des travaux de concertation avec les collectivités territoriales et les entreprises pour permettre la mutualisation des réseaux et des conditions d'accès spécifiques au réseau 5G pour certains usages ciblés (véhicules autonomes, santé, énergie, industrie).

LES RAPPORTS DE
L'OPECST



N°1488

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

QUINZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la présidence de l'Assemblée nationale

le 11 décembre 2018

N°188

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE 2018 - 2019

Enregistré à la présidence du Sénat

le 11 décembre 2018

RAPPORT

au nom de

**L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES OUVERTES PAR LA 5G

**Compte rendu de l'audition publique du 8 novembre 2018
et de la présentation des conclusions du 6 décembre 2018**

PAR

M. Pierre HENRIET, député, et M. Gérard LONGUET, sénateur

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale

par M. Cédric VILLANI,

Premier vice-président de l'Office

Déposé sur le Bureau du Sénat

par M. Gérard LONGUET,

Président de l'Office

**Composition de l'Office parlementaire d'évaluation
des choix scientifiques et technologiques**

Président

M. Gérard LONGUET, sénateur

Premier Vice-président

M. Cédric VILLANI, député

Vice-présidents

M. Didier BAICHÈRE, député
M. Patrick HETZEL, député
Mme Huguette TIEGNA, députée

M. Roland COURTEAU, sénateur
M. Pierre MÉDEVIELLE, sénateur
Mme Catherine PROCACCIA, sénateur

DÉPUTÉS

M. Julien AUBERT
M. Philippe BOLO
M. Christophe BOUILLON
Mme Émilie CARIOU
M. Jean-François ÉLIAOU
Mme Valéria FAURE-MUNTIAN
M. Jean-Luc FUGIT
M. Claude de GANAY
M. Thomas GASSILLOUD
Mme Anne GENETET
M. Pierre HENRIET
M. Antoine HERTH
M. Jean-Paul LECOQ
M. Loïc PRUD'HOMME

SÉNATEURS

M. Michel AMIEL
M. Jérôme BIGNON
Mme Laure DARCOS
Mme Annie DELMONT-KOROPOULIS
Mme Véronique GUILLOTIN
M. Jean-Marie JANSSENS
M. Bernard JOMIER
Mme Florence LASSARADE
M. Ronan LE GLEUT
M. Rachel MAZUIR
M. Pierre OUZOULIAS
M. Stéphane PIEDNOIR
Mme Angèle PRÉVILLE
M. Bruno SIDO

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE SUR LES PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES OUVERTES PAR LA 5G	7
TRAVAUX DE L'OFFICE	11
I. COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 8 NOVEMBRE 2018.....	11
II. COMPTE RENDU DE LA REUNION DU 6 DECEMBRE 2018 PRESENTANT LES CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 8 NOVEMBRE 2018	33
ANNEXES	39
<i>Annexe 1 : Présentation de M. Alain Pouyat, Président de Diginotech, membre de l'Académie des technologies</i>	<i>41</i>
<i>Annexe 2 : Présentation de M. Alain Sibille, Professeur à Télécom ParisTech</i>	<i>45</i>
<i>Annexe 3 : Présentation de M. Marceau Coupechoux, Professeur à Télécom ParisTech et à l'École Polytechnique.....</i>	<i>50</i>
<i>Annexe 4 : Présentation de Mme Anne Laurent, Directrice Mobile et Innovation de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes (ARCEP)</i>	<i>59</i>
<i>Annexe 5 : Présentation de M. Gilles Brégant, Directeur général de l'Agence nationale des fréquences (ANFR)</i>	<i>63</i>
<i>Annexe 6 : Présentation de M. Olivier Merckel, Chef de l'unité d'évaluation des risques à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).....</i>	<i>71</i>

CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE SUR LES PERSPECTIVES TECHNOLOGIQUES OUVERTES PAR LA 5G

La **cinquième génération de standards de téléphonie mobile**, dite « 5G », est annoncée comme une innovation de rupture. Face à un certain emballement, l'Office et vos rapporteurs ont voulu identifier les **enjeux technologiques réels derrière le concept un peu marketing de « révolution 5G »**.

Les standards de téléphonie mobile ont pour origine le travail de **normalisation** effectué par l'**Union internationale des télécommunications** (UIT), agence des Nations Unies spécialisée dans les technologies de l'information et de la communication. Elle s'appuie à cette fin sur un groupe en charge de traiter les questions techniques et d'exploitation relatives aux radiocommunications. En 2013, ce groupe a commencé à préparer un **nouveau standard IMT** - pour *International Mobile Telecommunications* -, appelé IMT-2020, comme il l'avait fait dans les années 2000 pour définir la 4G, qui porte le nom de standard IMT-Advanced. Il faut noter que l'UIT s'appuie sur un regroupement mondial d'organismes de standardisation en télécommunications, appelé le 3GPP (3rd *Generation Partnership Project*).

La norme IMT-2020 ou 5G vise à répondre à la question des limites de la 4G, tout en se situant dans son prolongement : elle **ne correspond pas à un saut technologique de grande envergure**. Il s'agit donc d'évoluer dans la continuité afin de relever les défis des limites du standard actuel, qui sont celles de **réseaux engorgés** dans des zones à trafic ponctuel élevé, comme lors de grands rassemblements, la capacité à fournir un accès aux réseaux à une **grande quantité d'objets connectés**, enfin, l'existence de **délais de latence trop longs**.

Il faut observer que les technologies mobiles ont évolué au rythme des innovations technologiques et des demandes sociales : le déploiement de la 5G devrait ainsi **accompagner l'ultra-connectivité de la société**. Car la cinquième génération de standards de téléphonie mobile ira **plus loin qu'une simple augmentation des débits**. L'impact devrait être important non seulement en termes techniques, mais aussi pour l'économie et la société.

L'Office n'a pas souhaité aborder **toutes les questions posées par la 5G** : les réseaux mobiles sont de plus en plus au cœur du quotidien de nos concitoyens, ce qui pose de **nombreuses questions politiques, économiques, sociétales et de cohésion territoriale, notamment autour de leurs usages**. Il incombera aux commissions des affaires économiques et du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale et du Sénat d'étudier précisément ces enjeux.

Cependant, il peut d'ores et déjà être noté que la connexion 5G en ultra haut débit permettra davantage que d'améliorer la qualité de la diffusion des vidéos en ultra haute définition : elle garantira en effet la **couverture de besoins spécifiques dans des secteurs variés** ainsi que les **usages liés à l'Internet des objets**¹. Les communications entre une grande

¹ Cf. la note scientifique de l'Office n°1 consacrée aux objets connectés, sur les sites du Sénat :

http://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opecst/quatre_pages/OPECST_2018_0013_note_objets_connectes.pdf

ou de l'Assemblée nationale :

quantité d'objets connectés devraient être facilitées, et ce dans le cadre de réseaux plus fiables avec une très faible latence. Car l'innovation introduite par la 5G se situe d'abord à ce niveau : permettre des **communications massives, quasiment en temps réel**, grâce à l'optimisation des bandes de fréquence par des **modulations numériques plus complexes** et un **meilleur pointage des faisceaux**. Ces avancées doivent conduire à assurer la couverture de besoins spécifiques dans des secteurs parfois critiques :

- **l'énergie**, tant au niveau de la production, du stockage que du transport d'énergie lui-même ;

- la **santé**, avec la question des diagnostics médicaux et des opérations à distance en temps réel ou téléchirurgie ;

- les **transports**, parce qu'ils demanderont, à l'heure des véhicules autonomes, des temps de réaction très courts, surtout en cas de risques d'accidents.

D'autres secteurs également, comme les **médias** ou **l'industrie** plus généralement, tireront profit de la 5G. La réalité virtuelle comme la réalité augmentée seront, en outre, facilitées.

Les **initiatives en cours** pour développer la 5G sont nombreuses, tant au niveau mondial ou européen que national. La France s'oriente donc vers **l'adoption de ce nouveau standard**. En juillet 2018, a été publiée la **feuille de route 5G de la France** et le programme de travail idoine de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes (Arcep). Des **expérimentations** sont en cours depuis cet automne et une **consultation publique** sur l'attribution des bandes de fréquence vient d'être ouverte. En 2019, **l'appel à candidatures pour les attributions de fréquences** sera lancé.

Les incertitudes sont nombreuses quant au choix des **bandes de fréquences**, dont le spectre est très congestionné. Trois, toutes supérieures à la limite supérieure de la très haute fréquence, soit 300 mégahertz, sont aujourd'hui envisagées : celles des **700 mégahertz**, **3,5 gigahertz** et **26 gigahertz**. Chacune présente des spécificités : la première a l'avantage d'une **latence réduite** mais présente une **capacité limitée** ; la seconde ne peut **pas couvrir tout le territoire** et nécessitera donc de recourir en complément à des **bandes basses** pour assurer une couverture plus complète ; la troisième est **très directive** et ne fonctionne donc qu'en **l'absence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur**, ce qui convient davantage à la structure géographique et à l'habitat des États-Unis qu'à ceux de la France.

Ces trois bandes de fréquences ont pour point commun d'être actuellement **toutes occupées**, notamment par des utilisateurs gouvernementaux (espace, météo, ministère de l'intérieur, ministère de la défense...). Il faudra donc faire **cohabiter** la 5G avec ces réseaux ou les **exproprier** puis les faire déménager au sein du spectre. Les choix à opérer et leurs modalités sont complexes, car il faudra maximiser la mobilisation de la bande passante disponible et **harmoniser ces choix au niveau international, ou au moins européen**. La 5G ne va pas faire disparaître la 4G : ces réseaux vont coexister et, dans un premier temps, la 5G consistera surtout à **désengorger les réseaux 4G**, qui saturent dans les zones de densité importante des utilisateurs et à haut niveau de trafic. Après cette amélioration des performances, des changements qualitatifs pourront intervenir dans un deuxième temps

autour de **nouvelles fonctionnalités pour nos sociétés**. Elles concerneront, en particulier, les usages liés au temps réel et à la gestion des objets connectés.

Les **investissements pour les réseaux d'infrastructures** seront importants, ainsi des travaux seront nécessaires pour évoluer d'une antenne 4G à une antenne 5G. Ils sont toutefois à relativiser parce que le même support pourra être utilisé **simultanément** à travers des cellules dites « multitechnologiques » et parce qu'une grande partie des progrès en la matière seront **virtualisés**, c'est-à-dire qu'ils passeront plus largement par des couches logicielles que par des couches physiques. Ces investissements, tout type de réseaux confondu, ont d'ailleurs représenté, pour les opérateurs de télécommunications, 10 milliards d'euros pour les services fixes et mobiles en 2017, dont trois milliards d'euros pour les seuls mobiles. Cette virtualisation impliquera une certaine vigilance en termes de **sécurité des réseaux**.

Les préoccupations associées à **l'exposition des particuliers aux ondes électromagnétiques** des radiofréquences seront de plus en plus grandes à mesure que se développent ces technologies, d'autant plus que l'impact de ces dernières sur la santé continue de faire l'objet de débats scientifiques. Les études menées par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) et l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)¹ ont conduit à reconnaître les radiofréquences comme **cancérogènes possibles**, en revanche les effets biologiques observés n'ont pas encore apporté la preuve d'un risque certain sur l'homme en matière de cancérogénicité. Il faut noter, de plus, que les **fréquences hautes**, dont certaines seront utilisées par la 5G, **pénètrent moins le corps humain**, ce qui peut sembler, *a priori*, rassurant. Ces préoccupations légitimes appellent une plus grande **transparence**, afin de permettre un déploiement dans un **climat de confiance**.

En conclusion, l'Office formule les recommandations suivantes :

- en matière de **santé publique**, permettre au monde de la recherche, en particulier à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), de pouvoir disposer de **données précises** émanant des opérateurs et des constructeurs d'antennes, tant sur l'exposition et la durée d'exposition que les technologies utilisées par les antennes ;
- garantir le financement de **l'appel à projets de recherche** de l'ANSES sur les risques liés à l'exposition aux radiofréquences ;
- poursuivre les **expérimentations 5G** en cours et lancer dès 2019 des pilotes 5G « grandeur nature » ;
- conduire des travaux de **concertation avec les collectivités territoriales et les entreprises** pour permettre autant que faire se peut la **mutualisation des réseaux** et des **conditions d'accès spécifiques au réseau 5G pour certains usages ciblés** (transport avec les véhicules autonomes, santé, énergie et industrie).

¹ Dès 2002, le CIRC a classé les champs basse fréquence comme cancérogènes possibles puis a élargi en 2011 cette classification aux champs électromagnétiques de radiofréquences Cf. le communiqué du CIRC de 2011 : https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_F.pdf ainsi que la page de l'Anses consacrée aux effets sanitaires des technologies de communication sans fil : <https://www.anses.fr/fr/content/radiofréquences-téléphonie-mobile-et-technologies-sans-fil>

TRAVAUX DE L'OFFICE

I. COMPTE RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 8 NOVEMBRE 2018

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Chers collègues, je voudrais vous remercier de vous être libérés pour participer à cette audition publique organisée par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, et consacrée aux perspectives qu'ouvre le développement de la nouvelle norme 5G. Je souhaite signaler qu'il s'agit d'une audition publique ouverte à la presse et à ceux qui le souhaitent. Je vous présente les excuses de notre collègue premier vice-président Cédric Villani qui devrait nous rejoindre au cours de la matinée. Je m'en félicite, car sa contribution est toujours extrêmement utile et à forte valeur ajoutée dans les travaux de notre Office.

Nous parlons de la cinquième génération de standard de téléphonie mobile. Je me souviens de l'époque où, lorsque j'étais ministre des télécommunications, nous avons créé France Telecom en lieu et place de l'ancienne direction générale des télécommunications (DGT). Le numérique était déjà réel dans les activités filaires, mais non le mobile qui était encore analogique, avec 200 000 abonnés. On mesure le chemin parcouru.

Le développement de la 5G devrait accompagner l'ultraconnectivité de la société, et particulièrement des objets qui communiquent entre eux. Des perspectives fantastiques existent dans des domaines majeurs. Il y a par exemple la possibilité d'une énergie décentralisée qui n'est pas conforme à l'idée que nous avons du système énergétique, en tout cas électrique, qui est très centralisé et très contrôlé, et se répercute dans tout l'espace européen. Il s'agirait par exemple de gérer la production, la distribution et le stockage sur la base d'une extrême réactivité, sur des plates-formes locales.

Ensuite, le secteur de la santé est bien entendu concerné. Je serai prudent, car je ne connais pas bien le sujet. Nous avons en revanche des collègues très compétents. En tant qu'élus d'un département à faible densité de population, la télé médecine, la télé chirurgie et le télé diagnostic seront nécessaires et la 5G va y participer.

Enfin, le transport est un secteur important. Libérer le conducteur de la responsabilité de conduire suppose de gérer des informations innombrables et d'avoir une réactivité immédiate, ce qui suppose une infrastructure qui le permette.

La 5G apparaît comme le partenaire indispensable de ces trois évolutions importantes. L'Office essaie de comprendre, et se rassure en constatant que la France s'y intéresse. En juillet 2018 a été publiée la feuille de route 5G pour la France, un plan de bataille pour faire de notre pays un leader de la 5G. Des expérimentations sont en cours depuis l'automne 2018. La consultation publique sur l'attribution des bandes de fréquence a été lancée. L'appel à candidatures pour les attributions de fréquence se déroulera en 2019.

Nous avons de nombreuses questions ce matin. Quel saut de performance la 5G permet-elle ? Quelles briques technologiques et quels réseaux d'infrastructure sont nécessaires ? Cela s'inscrit-il dans une coopération européenne ou mondiale, la dimension mondiale étant plus évidente que la dimension européenne en matière de communication ? Quelle sera la place de la 5G au sein du spectre des bandes de fréquence ? Nous avons fait le choix, depuis une quarantaine d'années, de la nationalisation de l'espace hertzien. Le libéral que je suis s'en indigne, mais c'est beaucoup plus pratique pour fonctionner. Les pouvoirs publics sont très impliqués dans le déploiement de l'accès au numérique sous toutes ses formes. Enfin, la 5G présente-t-elle des risques particuliers pour notre société dans laquelle la

peur est une marchandise abondante et largement exploitée ? Nous sommes à une époque où la meilleure façon de remplir une salle est d'annoncer des catastrophes, par exemple avec les compteurs Linky.

Je souhaite remercier pour leur présence les sept intervenants de notre table ronde. Alain Pouyat, président de Diginotech, membre de l'Académie des technologies, reviendra sur les origines de la cinquième génération de standard de téléphonie mobile. Alain Sibille, professeur à Télécom Paris Tech, abordera la problématique technologique de la transmission des signaux 5G. Marceau Coupechoux, professeur à Télécom Paris Tech et à l'École Polytechnique, nous présentera les défis et innovations technologiques liés aux réseaux de communication. Michel Combot, directeur général de la Fédération française des télécoms, organisme professionnel, présentera le rôle des opérateurs, les expérimentations et impacts sectoriels. Anne Laurent, directrice des mobiles et de l'innovation à l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (ARCEP), expliquera la feuille de route française en matière de 5G. Gilles Brégand, directeur général de l'Agence nationale des fréquences (ANFR), soulignera les enjeux des spectres. Enfin, Olivier Merckel, chef de l'unité d'évaluation des risques à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), présentera son point de vue sur les risques de cette technologie.

Pierre Henriet supplée ce matin Cédric Villani. Je rappelle que notre Office rassemble des représentants de l'Assemblée Nationale et du Sénat.

M. Pierre Henriet, député. – Je vous remercie. Je voudrais en premier lieu confirmer les excuses de notre premier vice-président Cédric Villani, requis à Matignon pour des décisions importantes concernant le plan relatif à l'intelligence artificielle, autre sujet qui a été évoqué ici.

Nous sommes très intéressés par la présentation des enjeux multiples que recouvre ce nouveau réseau 5G et cette nouvelle norme de télécommunication permettant un flux qui pourrait s'élever jusqu'à 20 gigabits par seconde. Cette évolution est à mettre en rapport avec le développement des objets connectés. Notre collègue Didier Baichère, qui regrette également de ne pouvoir être présent, a consacré au sujet la première note scientifique de l'Office, publiée en mars 2018.

Nous attendons beaucoup de la 5G dans une évolution très rapide. Les premiers réseaux de téléphonie mobile datent d'il y a 30 ans avec quatre générations principales avant la 5G, sans compter d'autres standards intermédiaires comme le GPRS. Cette évolution rythme l'offre et la performance des terminaux individuels ainsi que tout l'équipement de connexion qui les accompagne. Ce sujet est évidemment un enjeu technologique majeur, mais nous devons être attentifs aux aspects sociologiques et aux éventuelles incidences sur la santé, notamment dans le prolongement de notre audition publique du 31 mai 2018 sur le rapport de l'ANSES relatif à l'hyperélectrosensibilité aux ondes électromagnétiques, sujet auquel s'intéresse particulièrement Cédric Villani.

La 5G aura-t-elle des effets plus importants que les réseaux 3G et 4G ? Nous sommes très désireux d'entendre le représentant de l'ANSES sur ce sujet et le remercions de s'être rendu de nouveau disponible pour l'Office.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – La parole est à Monsieur Pouyat, qui va nous parler de l'origine de cette nouvelle norme.

M. Alain Pouyat, président de Diginotech, membre de l'Académie des technologies. – Je ferai un rapide historique des innovations que nous avons connues en

matière de réseaux, sous le regard de Monsieur Longuet qui est intervenu dans cette évolution à plusieurs reprises.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – La performance actuelle des réseaux a atteint 40 fois ce que nous attendions dans le meilleur des cas avec Radiocom 2000. Nous nous sommes toutefois largement trompés concernant la révolution sociétale que constituerait la téléphonie mobile.

M. Alain Pouyat. – Je commencerai en effet l'histoire par Radiocom 2000, premier réseau de type cellulaire, lancé en 1981. Cette technologie permettait d'augmenter considérablement le nombre d'utilisateurs en réutilisant les fréquences. Il y avait 60 000 abonnés deux ans après le lancement de Radiocom 2000.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Le réseau comptait 200 000 abonnés en 1986.

M. Alain Pouyat. – Les réseaux précédents avaient plafonné à 4 000 ou 5 000 abonnés. Radiocom 2000 était un réseau analogique pour le transport de la voix. La seconde génération de téléphonie mobile, le GSM, est lancée en 1992 par un consortium européen composé d'industriels et d'opérateurs. Le GSM devient une norme européenne puis mondiale. Seuls deux pays ne l'adoptent pas, les États-Unis et le Japon, qui développent leur propre norme 2G. Le GSM est une technologie entièrement numérique, consacrée essentiellement à la téléphonie puis à la transmission de données avec le GPRS qui fournit un débit de 40 kilobits par seconde, comme à la radio. Le EDGE lancé deux ans plus tard offre un débit de 200 kilobits par seconde, donc cinq fois supérieur. Il est encore utilisé aujourd'hui, notamment par des médecins.

Les Japonais ont été surpris par le succès du GSM. Avec l'appui de leur opérateur historique Docomo, le premier opérateur mondial avec 60 millions de clients à l'époque, ils ont proposé une troisième génération nommée UMTS. Ce standard est adopté par de nombreux pays sauf les États-Unis et les pays sous influence américaine comme la Corée du Sud. Il a été déployé en Europe en 2003. Avec un débit proche de 300 kilobits par seconde, il n'y avait cependant pas beaucoup de différence entre l'UMTS et le réseau 2G EDGE. À la septième année d'existence de l'UMTS, le mégabit a été atteint, mais les opérateurs pensaient déjà à déployer la 4G. L'UMTS apparaît rétrospectivement comme un réseau de trop.

La 4G est déployée en France en 2013, avec trois ans de retard par rapport à la Corée du Sud et aux États-Unis. Ce réseau est immédiatement très performant en raison de l'adoption du protocole IP. Il bénéficie de la robustesse et de l'efficacité de ce protocole. C'est un standard mondial. Pour la première fois, les réseaux radios et filaires sont homogènes, ce qui permet à tous les services existants de trouver leur place sur les réseaux radios. La 4G connaît un grand succès. Par ailleurs, de nouvelles technologies comme les antennes multiples, l'ADS fréquence, et les radios logicielles et la possibilité de remplacer les équipements de télécommunications par des systèmes logiciels ont été déployées simultanément à la 4G. Le mégabit transformé en 4G coûte dix fois moins cher que le mégabit transformé en 3G, en raison de la grande performance de la nouvelle technologie.

À chaque décennie correspond une génération de système de télécommunication : la première génération durant les années 1980, la deuxième durant les années 1990, la troisième durant les années 2000. Les années 2010 sont celles de la 4^e génération de téléphonie mobile. La 5^e génération est naturellement attendue pour les années 2020.

Le point majeur concerne les ruptures portées par chaque génération. La première génération a porté le cellulaire, la deuxième le numérique, la quatrième la norme IP, pour la première fois dans le monde entier. Il n'y a pas d'autre 4G que celle de la norme IP. La 3G aura

pour sa part été le produit d'un affrontement d'industriels entre l'Europe et le Japon, mais aussi entre la culture vieillissante des télécommunications, qui refusent la norme IP en 3G alors qu'elle gagne tous les réseaux fixes. En fait, on a assisté à un choc de culture entre la culture vieillissante des télécommunications et le dynamisme du monde d'internet avec son pragmatisme.

La 4G trouve des limites aujourd'hui, dont la difficulté de couvrir les grandes manifestations dans les stades ou les concerts. La latence s'élève à 40 millisecondes en 4G contre, par exemple, 100 à 200 millisecondes dans la technologie précédente, mais elle ne permet pas les applications en temps réel. Il s'agit, par ailleurs, de relever le défi de l'internet des objets, qui regroupe avion connecté, maison connectée, ville connectée, compteurs d'eau, bonbonnes de gaz délivrant les données de la localisation et leur taux de remplissage, suivi des bovins dans les élevages, etc. Cette évolution suppose d'avoir un réseau très ouvert, faisant de l'*indoor* profond, relevant peu de données mais à une fréquence régulière, à des coûts très faibles, de l'ordre de quelques euros par an et par objet. Nous avons créé des réseaux spécifiques à cette fin avec deux *startups* françaises à Grenoble et Toulouse, qui ont élaboré les standards LoRaWAN et Sigfox. La vocation de la 5G consiste à couvrir tous ces besoins. Le bas débit en 5G est à bas coût, tandis que le très haut débit permet un temps de réponse très court.

Les mobiles ont énormément évolué. Ils sont devenus la « télécommande » de la vie quotidienne, un instrument de paiement, une télévision de poche avec de la VOD ou de la SVOD comme Netflix. La publicité sur les mobiles a dépassé cette année la publicité sur les réseaux fixes en volume. Les particuliers passent en moyenne cinq heures par jour sur leur mobile, contre quatre heures devant la télévision.

Pour répondre à ces nouveaux besoins, l'autorité nationale et les industriels se sont concertés pour concevoir la 5^e génération. Il s'agit de raisonner en partant des applications verticales. Par exemple, la ville intelligente, la ville connectée ou la ville durable supposent que tout soit relié et que les données soient partagées. Une autre application vise à aider la voiture pour limiter les risques d'accident, ce qui suppose que la voiture communique avec des infrastructures tierces et sans latence.

La 5G s'oriente de deux manières, d'une part, dans la continuité et le prolongement de la 4G actuelle avec de meilleures performances, d'autre part, pour répondre à des besoins de débit supérieur au gigabit ou pour traiter des problèmes de densité importante des utilisateurs. Cela nécessite de mobiliser la bande passante disponible. Les bandes de fréquence attribuées aux opérateurs toutes fréquences confondues atteignent à peine 100 mégahertz. Le bon débit suppose d'avoir une bande passante supérieure à 1 000 mégahertz. La 5G s'oriente vers la très haute fréquence, ce qui constituera la rupture majeure de cette technologie.

Ce sujet constitue un enjeu important étant donné que nous n'avons pas une grande maîtrise de ces types de fréquence au niveau civil. Il faudra gérer de telles innovations en quelque sorte en terre inconnue, sans passer à côté d'opportunités industrielles. Enfin, il faut se poser la question de la sécurité de ces réseaux. La 5G sera totalement virtualisée : tout sera logiciel, donc pourra se localiser n'importe où, dans un *cloud*, au-delà du pays, en Chine, aux États-Unis ou en Irlande, ce qui suppose d'assurer la cybersécurité. Il n'y aura pas de 5G si nous ne maîtrisons pas la cybersécurité. Il n'y aura pas de transformation de la société numérique si la cybersécurité n'est pas maîtrisée.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Merci pour cette très belle introduction. Nous souhaitons maintenant écouter les autres intervenants qui approfondiront des points plus particuliers. Je donne la parole à Alain Sibille, à qui je voudrais poser la question de savoir s'il y a une asymptote dans cette technologie ?

M. Alain Sibille, professeur à Télécom Paris Tech. – Merci Monsieur le président. Je parlerai de la problématique des signaux 5G. Je suis membre de l'URSI France, partie française de l'Union radioscopique internationale, qui fêtera son centenaire l'an prochain, et dont la France est partie prenante. Les progrès technologiques se poursuivent dans le domaine de la 5G avec des particularités spécifiques à ce futur standard.

Les antennes à l'émission, à la réception et l'espace libre ou obstrué sont deux aspects majeurs de cette technologie. Une formule mathématique relie la puissance reçue dans le récepteur à la puissance émise : le rapport entre les deux signifie que les puissances reçues résultent des caractéristiques propres aux antennes d'émission et de réception, ou gains des antennes, et de la diffusion de la puissance radio dans l'espace. Cette formule de propagation montre que la puissance diminue comme le carré de la distance et comme le carré de la fréquence, ce qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de la 5G.

Une autre formule mathématique, due à Claude Shannon, est fondamentale dans le domaine de la communication. Elle fait apparaître la notion de capacité, en bits/seconde. Cette capacité concerne le débit en tant que tel. Elle fait intervenir la puissance reçue par le récepteur et les bruits électroniques de nature intrinsèque ou extrinsèque qui limitent la possibilité de détecter et de reconnaître les signaux numériques reçus.

Un autre aspect important de cette formule concerne la largeur de bande, exprimée en hertz. Car la capacité est directement proportionnelle à la largeur de bande. L'augmentation du débit se traduit donc souvent par l'exigence de bandes plus larges. Cette formule simple permet aussi d'aboutir à une notion extrêmement intéressante, l'efficacité spectrale, ou rapport entre le débit et la bande mise à disposition par la puissance publique.

Il s'agit donc de pousser le plus possible cette efficacité spectrale, moyennant les limites existantes, afin d'utiliser autant que possible le spectre qui correspond à une limite au-delà de laquelle on ne peut pas aller. Parmi les problématiques importantes des réseaux sans fil, un sujet important concerne la montée en fréquence des 900 mégahertz du GSM aux 30 à 80 gigahertz de la 5G et peut-être au-delà. On a vu que, pour une puissance émise donnée, la puissance reçue varie comme l'inverse du carré de la fréquence. Si nous passons, par exemple, de 3 à 30 gigahertz, niveau minimal des ondes millimétriques, la puissance reçue est divisée par 10 au carré, soit par 100. La technologie est limitée par le bruit dans le récepteur, et la diminution de la puissance reçue par 100 complexifie le fonctionnement. Il y a une atténuation de propagation importante à mesure que nous montons en fréquence, ce qui signifie que la portée diminue.

D'autres effets plus insidieux sont constatés s'agissant de cette technologie. Par exemple, la propagation se déroule de manière plus directive. La lumière se diffuse en ligne droite. La diffusion est beaucoup plus diffractive en très basse fréquence, ce qui permet aux ondes de « tourner » autour des bâtiments. L'augmentation en fréquence rend l'onde plus directionnelle. Si le corps d'une personne interrompt un faisceau à 60 gigahertz en passant devant, il peut y avoir une atténuation importante. De fait, la portée est plus faible, la pénétration à l'intérieur des bâtiments est plus complexe et il faut, le cas échéant, orienter les antennes pour tenir compte du phénomène de directionnalité.

Parmi les autres difficultés technologiques, la haute fréquence offre des performances moins bonnes des antennes, des pertes au niveau des circuits électroniques. Les pertes sont moins dramatiques au fur et à mesure que la technologie progresse, mais elles peuvent avoir des conséquences. C'est par exemple le cas pour les *smartphones*, ces terminaux d'usage courant, moins coûteux, aux performances moins élevées, dont les batteries nécessitent d'être vigilant en termes de consommation. Nous devons, de plus, intégrer les antennes aux appareils le plus possible, ce qui diminue leur performance. Ce

problème concerne moins les stations de base qui sont plus grandes, et pour lesquelles l'opérateur paie un peu plus cher. Le problème existe toujours, mais il est de moindre nature.

Parmi les autres problématiques, il y a celle du mouvement : lorsqu'un terminal se déplace, le signal varie au fil du temps, ce qu'on appelle les « évanouissements ». Ce sujet est d'autant plus important que la mobilité est grande, particulièrement à haute fréquence. Le traitement du signal à l'émission et à la réception doit faire attention à l'effet Doppler. Les usages en grande mobilité doivent tenir compte de ce sujet.

Les interférences évoquées précédemment sont un problème naturel des réseaux cellulaires, de la 2G à la 5G. Or les cellules des réseaux de télécommunications se complexifient. Nous essayons donc parfois de bénéficier de ces particularités pour tenter de limiter les effets néfastes des interférences et de bénéficier de la complexité des réseaux.

Une autre particularité importante est la dissymétrie traditionnelle, liée aux usages, entre la liaison montante et la liaison descendante. Cette dernière est liée aux signaux qui viennent du réseau, c'est-à-dire des stations de base. La liaison montante est liée aux transmissions reçues depuis les usagers. En général, le débit plus important vient du réseau, par exemple pour consulter une vidéo, alors que la communication téléphonique simple mobilise quelques kilobits, c'est-à-dire peu. L'utilisateur peut vouloir envoyer de la vidéo, ce qui diminue la dissymétrie entre liaison descendante et montante. Les usages peuvent être dissymétriques selon des cas de figure qui sont très divers. La dissymétrie n'était pas bien prise en compte dans les réseaux historiques. Ce sujet sera pris en compte de façon plus efficace dans les réseaux 5G.

Un dernier point sur la 5G concerne les applications en temps réel. Le délai de latence pour la 5G est de l'ordre de grandeur de la milliseconde. Mais une limitation conséquente est la vitesse finie de la lumière, c'est-à-dire des ondes électromagnétiques, de 300 000 kilomètres/seconde, soit déjà quelques microsecondes pour des distances de quelques kilomètres. La propagation de la lumière dans les fibres optiques étant moins rapide que dans l'espace, il faudra d'autant plus tenir compte de cette limitation.

Les progrès technologiques en émergence concernent notamment la technologie dite MIMO¹, commercialisée depuis dix ans. Plusieurs éléments sont associés à une même antenne à l'émetteur et au récepteur, ce qui favorise le pointage de faisceau. Cette technologie améliore la propagation du signal. La puissance au niveau du récepteur s'en trouve améliorée et la variété du signal peut être pondérée par de meilleures antennes. La consommation électrique peut aussi s'avérer moins élevée, ce qui représente un aspect très important pour les usagers, comme pour les stations de base. Enfin, un autre point important est lié à la possibilité de communiquer simultanément avec plusieurs usagers, ce qui offre un débit agrégé plus important pour une même fréquence.

La montée en fréquence est une autre avancée importante de la 5G. La propagation sera de moindre portée mais elle permet de réutiliser le spectre plus facilement. Les coûts d'investissement doivent être présents à l'esprit, car il faudra installer de nombreuses stations de base pour bénéficier de cette capacité de réutilisation du spectre.

¹ MIMO : Multiple-Input Multiple-Output (« entrées multiples, sorties multiples » en français) est une technique de multiplexage utilisée dans les réseaux sans fil et les réseaux mobiles permettant des transferts de données à plus longue portée et avec un débit plus élevé en utilisant plusieurs antennes tant au niveau de l'émetteur que du récepteur.

D'autres aspects intéressants liés aux développements technologiques de ces futurs standards doivent être pris en compte. Une flexibilité plus importante sera nécessaire en raison de la multiplicité des dispositifs. Les *smartphones* ont besoin de beaucoup de débit. Cette flexibilité peut être facilitée par l'agrégation de différentes bornes de fréquence. Les réseaux 4G et 5G vont cohabiter durant de nombreuses années, y compris avec le WiFi, ce qui offrira un débit global important. La communication pourra se dérouler en alternance très rapide entre la montée et la redescende des signaux au sein d'un même canal fréquentiel, ce qui permet de gérer la flexibilité de façon assez intéressante.

En outre, l'efficacité spectrale de la formule de Shannon consiste à exploiter au mieux une bande de fréquence donnée. Or les progrès se déroulent au niveau des canaux fréquentiels avec la 5G. Il faut pouvoir faire au mieux avec les fréquences disponibles : donner beaucoup à ceux qui demandent beaucoup, moins à ceux qui demandent moins, et utiliser des modulations numériques plus complexes. Pour une fréquence donnée, le nombre de mégabits sera supérieur, mais restera limité par la formule de Shannon. Le flux de bits entrant, de la voix ou de l'image, donnera lieu à un codage canal, ce qui améliore la robustesse de la communication. Ces progrès, certes limités, permettront d'améliorer l'efficacité spectrale des réseaux 5G.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Marceau Coupechoux, c'est à vous.

M. Marceau Coupechoux, professeur à Télécom Paris Tech et à l'École Polytechnique. – Je vous remercie, Monsieur le président. Je vous parlerai des innovations au niveau des réseaux. Les réseaux cellulaires devraient s'introduire dans de nombreux aspects de la vie quotidienne et de nombreux secteurs de l'économie. Un certain nombre d'objectifs ont été définis par l'Union internationale des télécommunications (UIT) pour la cinquième génération de réseau mobile. Ils se divisent en très haut débit, accès massif, et communications critiques.

Le très haut débit s'inscrit dans la continuité des générations précédentes, jusqu'à 20 gigabits par seconde en 5G, d'un point de vue théorique, par exemple pour une personne seule directement en face d'une antenne. Ce débit est partagé avec d'autres utilisateurs d'une cellule, ce qui permet d'obtenir plutôt 100 mégabits par seconde. Ces objectifs ont été fixés pour la 5^e génération dans un avenir de moyen terme. La première version de la 5G sera relativement proche de la dernière version de la 4G. Les réseaux évoluent plutôt que subissent une révolution.

L'accès massif, ce qui correspond à l'internet des objets, est une dimension plus récente des réseaux de télécommunications. Nous parlons de millions de capteurs par kilomètre carré avec des débits très faibles. La première version de la 4G n'est pas en mesure de couvrir ce genre de trafic. La 5G se donne des objectifs de couverture et de durée de vie des batteries jusqu'à dix ans, même si cet objectif est optimiste. La latence est un paramètre très important si deux véhicules communiquent entre eux. L'UIT fixe un délai d'une à quatre millisecondes, sachant que nous sommes toujours limités par la vitesse de la lumière. Tout le monde n'aura pas accès à ce genre de latence, qui sera vraisemblablement réservée à des réseaux privés, dédiés à une industrie ou un service particulier. La fiabilité très importante de la 5G était jusqu'à présent inconcevable sur les réseaux sans fil traditionnels.

La formule de Shannon est utilisée depuis les années 1950. La capacité ou asymptote évoquée par le président Gérard Longuet dépend du nombre d'antennes et de la bande passante. Nous passons de 20 mégahertz en 4G à 400 mégahertz en 5G. Nous allons donc déployer de très nombreuses antennes, dans un premier temps 64 et pourquoi pas 256. Le faisceau de l'antenne peut être orienté vers l'utilisateur, alors que l'antenne 4G émet

uniformément. Des faisceaux simultanés peuvent être proposés par l'utilisateur qui pourra en effet avoir ses propres faisceaux, c'est ce que l'on appelle un traitement de signal « MIMO massif » associé à des algorithmes pour passer d'un faisceau à l'autre.

Où trouverons-nous cette bande ? Comment est-il possible de passer de 4 à 64 antennes ? La réponse se situe dans les ondes millimétriques, ces fréquences, comprises entre 30 et 300 gigahertz. Jusqu'à présent, les réseaux cellulaires utilisaient des fréquences inférieures à 6 gigahertz. Ce spectre est très congestionné, ce qui suppose de monter en fréquence. L'avantage est que la taille des antennes diminue lorsque la fréquence augmente. Nous allons pouvoir compenser ce problème de propagation par la focalisation de l'énergie sur un faible faisceau. Une technique classique utilisée depuis la 2G consiste à densifier les réseaux, c'est-à-dire à augmenter le nombre d'antennes par kilomètre carré. La capacité étant partagée entre les utilisateurs d'une même cellule, plus vous installez d'antennes, plus le débit sera important pour l'utilisateur.

Une grande cellule utilise des fréquences inférieures à 6 gigahertz pour couvrir une zone donnée. Ensuite, il faut déployer de petites cellules, le long des routes ou sur les lampadaires, qui desserviront l'utilisateur. Elles sont multitechnologiques (3G, 4G ou 5G), multibandes, avec des ondes millimétriques ou des fréquences sans licence du type WiFi. Un ensemble d'études sont indispensables pour prévoir les performances, optimiser et gérer les interférences.

L'accès massif requiert de nouvelles approches technologiques. Dans une cellule, chaque utilisateur se voit attribuer un sous-canal, dit orthogonal car il est sans interférence entre les utilisateurs. En 5G, il est possible de créer des sous-canaux extrêmement fins et flexibles de façon à accroître les connexions sur une même bande passante. L'objectif fixé par l'UIT consiste à multiplier par dix le nombre de connexions au kilomètre carré.

Un autre défi concerne l'économie d'énergie. Un certain nombre de dispositifs radios pourront rester éteints et n'être ouverts que pour envoyer un message. Le standard 5G permet d'éteindre les terminaux jusqu'à 400 jours, alors que la norme 4G ne lui permet pas s'éteindre plus de 3 secondes. Des techniques de répétition et de codage permettent d'augmenter la couverture de ces réseaux pour atteindre des zones non couvertes par la 4G, en intérieur profond des bâtiments ou dans des zones difficiles d'accès.

En ce qui concerne les communications critiques, le délai et la latence posent problème. En 4G, l'envoi d'un paquet demande une milliseconde, puis trois millisecondes pour obtenir l'accusé de réception. La latence est beaucoup plus faible en 5G, de l'ordre de la centaine de microseconde. L'acquittement de l'envoi d'un paquet peut advenir en 125 microsecondes. Il est aussi possible de préempter les ressources : lorsque des données critiques arrivent, les ressources sont préemptées et les autres flux sont interrompus. Imaginez deux véhicules communiquant entre eux, ils communiqueront directement entre deux sans passer par l'antenne relais, ce qui permet d'augmenter la puissance reçue, de diminuer les délais et d'augmenter la fiabilité.

Le réseau lui-même connaîtra des mutations relativement significatives. La virtualisation est une dimension importante de cette évolution. Auparavant, une fonction réseau était associée à un matériel. À présent, les fonctions réseaux sont de plus en plus logicielles : ce sont des programmes informatiques qui peuvent être placés dans des *data centers*, dont le matériel est générique, moins coûteux et géré de manière centralisée. L'augmentation de trafic entraînera une augmentation des fonctions logicielles, avec une certaine flexibilité.

Dans une infrastructure (câbles, antennes, etc.), vous pourrez par exemple créer une tranche pour internet, une tranche pour l'industrie, une tranche pour la télémédecine, etc. Les utilisateurs auront l'impression d'avoir accès à des réseaux complètement différents, l'un dédié au très haut débit, l'autre à l'accès massif. Les petits *clouds* créés dans les antennes relais concentreront des fonctions de traitement du signal, des fonctions de calcul complexe et des contenus populaires comme des vidéos préstockées et une boucle optique qui enverra un signal radio transmis à l'utilisateur.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Les parlementaires ici présents souhaiteront certainement vous poser de nombreuses questions. Nous sommes inquiets de l'obsolescence des technologies, après avoir investi lourdement, ce qui est une préoccupation pour les aménageurs du territoire. Michel Combot, directeur général de la fédération française des télécommunications (FFT), va nous présenter son ressenti ainsi que les orientations des opérateurs.

M. Michel Combot, directeur général de la Fédération française des télécoms. – Je vous remercie, Monsieur le président. Nous vous proposons de redescendre vers l'opérationnel. La fédération regroupe les opérateurs nationaux de télécommunications, opérateurs grand public, d'entreprises, virtuels ou physiques. Notre enjeu consiste à accompagner les usages du grand public et des entreprises. Le contexte de la 5G s'inscrit dans une évolution sans cesse grandissante des usages, notamment concernant le mobile. Nul n'osait imaginer qu'il y aurait plus de 60 millions d'utilisateurs sur les réseaux mobiles. La plupart des usages connus à l'orée de l'an 2000 sur un ordinateur passent aujourd'hui le plus souvent par le *smartphone*. Cette évolution qui ne fait que s'accélérer représente un véritable défi qui suppose d'anticiper. Les investissements des opérateurs en 2017 représentent 10 milliards d'euros pour les services fixes et mobiles, dont trois milliards d'euros pour le seul mobile. Ces investissements vont s'accélérer avec l'arrivée prochaine de la 5G.

L'enjeu pour la FFT consiste à replacer la 5G dans un environnement global. L'environnement est technologique, industriel et sociétal. Les réseaux mobiles, qui font partie de la vie quotidienne, posent de nombreuses questions sociétales autour de leurs usages. L'objectif consiste à trouver l'équilibre entre développements technologiques et fonctionnement d'une société, ce qui soulève de nombreuses questions.

La priorité pour les opérateurs en matière de 5G consiste à parler de modèle économique. La période des enchères sur les fréquences 3G dans les années 2000 est très présente dans la tête des opérateurs. Il a fallu du temps pour aboutir avec la 3G+ à un service répondant au besoin des clients.

Il est important d'étudier comment accompagner la transformation initiée par tout nouveau réseau. La 5G ne remplacera pas la 4G, pas d'un coup et globalement. Il convient d'analyser là où elle apportera une valeur ajoutée. La compréhension de l'apport de la 5G est cruciale pour savoir où les investissements doivent avoir lieu. De nombreuses expérimentations sont en cours avec les opérateurs, afin d'apprendre ce qu'est la 5G, et où celle-ci pourra apporter de nouveaux services. Des expérimentations sont en cours à Bordeaux, Lyon, Villeurbanne, Lille, Nantes, Marseille et Toulouse. Les opérateurs sont pleinement engagés pour faire de la 5G un véritable succès, éviter les écueils de la 4G et faire de la 5G une nouvelle expérience intéressante. Nous voyons des bénéfices à la 5G, comme la possibilité de raisonner en classes de services. Le réseau s'adaptera ainsi à la demande.

La première priorité pour la 5G sera de désengorger le réseau, notamment dans les zones à fort trafic. La 4G a démultiplié le nombre de zones à trafic élevé. Les réseaux 4G saturent lors d'un événement sportif ou culturel, dans les gares ou les lieux qui concentrent un

grand nombre de personnes à un moment donné. La 5G permettra de conserver l'expérience utilisateur avec un débit toujours plus important.

La seconde étape de la 5G permettra de transformer la société par de nouvelles fonctionnalités, dont le temps réel et la gestion des objets connectés. Le nombre actuel de 70 millions d'abonnés explosera avec la 5G. La priorité pour les opérateurs consiste à tester ces technologies, à la fois économiquement et technologiquement. Il s'agit de traduire les apports en technologies concrètes, ce qui nécessite d'apprendre. L'architecture des réseaux doit être repensée, ce qui induit un changement profond pour les opérateurs. Une nouvelle ère s'ouvre pour ces derniers.

La 5G est une promesse technologique, mais elle implique aussi d'ouvrir de nombreux chantiers pour en faire un succès. Il s'agit en premier lieu de trouver suffisamment de fréquences pour développer cette technologie et honorer les promesses de la 5G. Les fréquences se font rares en dessous de 6 gigahertz, or nous avons besoin de fréquences suffisantes pour couvrir les métropoles comme les petites villes. Nous militons pour avoir des bandes « propres » afin de répondre à toutes les promesses de la 5G. Il convient de connaître les priorités. Il faut aussi faire attention à ne pas réserver les fréquences à certains usages au détriment d'autres. La 5G est le réseau qui permet d'allouer dynamiquement les ressources. De même l'attribution de fréquences d'un point de vue géographique peut aussi constituer un écueil et être source d'inefficacité spectrale. Ce raisonnement peut différer en fonction de la nature des fréquences. En effet, les très hautes fréquences couvrent peu et permettent donc d'avoir deux utilisateurs différents dans une même zone. Nous militons pour un usage national des fréquences basses pour le cas des utilisateurs uniques.

L'enjeu majeur de la 5G consiste à participer au développement de nos sociétés industrielles et à l'amélioration de la vie quotidienne. Les enchères qui se sont déroulées récemment en Italie nous ont rappelé l'engouement que l'attribution des licences UMTS avait suscité dans les années 2000. Il faut faire attention au mirage des enchères qui apporte certes à court terme quelques milliards d'euros à l'État, mais qui n'est pas forcément le meilleur moyen de s'assurer que les fréquences seront utilisées pour de bons usages, notamment pour le développement des industries et les loisirs des particuliers. L'appel à candidatures doit permettre de privilégier l'investissement et le développement des services, plutôt que les seules ressources de l'État. En conclusion, une vision commune autour du développement de la 5G est fondamentale.

La 5G impose aussi de réfléchir aux modalités de déploiement. Le déploiement des antennes nécessitera des procédures administratives. La manière d'intégrer ces développements dans le respect des règles nationales et locales sera très importante. Ce travail a été mené à l'Assemblée nationale et au Sénat en amont de la 4G afin de voir comment accélérer le développement des réseaux. Le même travail devra être accompli pour le déploiement de la 5G. La fiscalité doit aussi être incitative pour développer cette technologie.

Un autre sujet important concerne l'exposition des particuliers aux ondes. Ce sujet ne doit pas être minimisé. Les opérateurs veulent instaurer un climat de confiance auprès des élus et du grand public. Le public doit comprendre quelles conséquences aura la 5G. La compréhension du sujet est très importante. Nous travaillons avec l'ANFR et l'ANSES pour comprendre ces phénomènes. Nous souhaitons que ce sujet soit pris à bras-le-corps dans une optique apaisée, en particulier dans les métropoles, pour que le déploiement de la 5G se déroule en confiance. La confiance est nécessaire pour que le grand public accompagne le déploiement et ne s'y oppose pas.

Un autre enjeu concerne la sécurité. La virtualisation des réseaux, de l'équipement de base au téléchargement d'un logiciel, engendre une architecture complètement différente des réseaux. La sécurité sera un élément clé dès la conception, en raison des millions d'objets présents sur les réseaux. Les partenaires publics doivent comprendre comment la sécurité sera traitée dans ces réseaux. C'est un travail à conduire avec l'Agence nationale de la sécurité informatique (ANSI).

Enfin, la 5G amène à collaborer avec d'autres secteurs industriels, en imposant aux télécommunications de s'intégrer plus fortement avec d'autres secteurs, notamment avec celui des transports pour le cas des véhicules connectés. Ce secteur représente un champ de travail important. Les véhicules sont de plus en plus connectés. Nous nous sommes engagés auprès de l'État à améliorer la couverture 4G sur les axes ferroviaires, routiers et autoroutiers. Cette couverture 4G élargie permettra de créer les usages du futur. Nous aurons ainsi un terrain fertile pour le développement des réseaux lorsque la 5G arrivera.

Nous travaillons avec l'ensemble des écosystèmes sur la transformation des données de sécurité, de la radio d'autoroute au système électronique des véhicules, par le réseau de télécommunications ou des antennes le long des routes et autoroutes. La rencontre entre le secteur du transport et celui des télécommunications n'est pas totalement évidente. Certains acteurs proposeront de déployer le WiFi sans nécessairement penser à l'avenir. Les choix que feront le gouvernement et la Commission européenne sur ce sujet seront très structurants. Nous développons ces technologies pour permettre la communication entre les véhicules et les infrastructures autoroutières. Un véhicule devra rester sous la couverture du réseau 5G même s'il n'est plus sur l'autoroute ou sur une route nationale, ce qui suppose que l'ensemble des services soit conçu pour pouvoir en profiter. La construction de cet écosystème est cruciale pour le succès de la 5G. Nous sommes mobilisés et il reste beaucoup à faire pour que la 5G soit un succès demain.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Nous vous remercions pour cette intervention et cet éclairage du côté des opérateurs. L'ARCEP est une autorité indépendante mais je m'interroge sur le statut de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

M. Gilles Brégrand, directeur général de l'Agence nationale des fréquences (ANFR). – Nous sommes un établissement public administratif, une sorte de « France Domaine » du spectre. Nous ne sommes pas indépendants, à la différence de l'ARCEP.

Mme Anne Laurent, directrice des mobiles et de l'innovation à l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (ARCEP). – Merci Monsieur le président. L'ARCEP est effectivement indépendante et notamment chargée de définir la procédure d'attribution des fréquences radio, qui sont le carburant nécessaire au déploiement de cette technologie 5G. Une procédure de codécision est mise en place. Nous proposons au gouvernement des modalités d'attribution, qu'il lui appartient ensuite de décider.

La 5G apporte un certain nombre de ruptures technologiques et d'usages : le saut de performance est un débit multiplié par 10, la latence divisée par 10, enfin, une fiabilité de la communication renforcée grâce à la possibilité de configurer le réseau en tranches. La qualité de service sera adaptée à chaque type d'usage. La 5G est un « capaciteur » : elle présente un potentiel d'usages très variés avec la réalité virtuelle, la réalité augmentée, l'amélioration de la qualité de la diffusion audiovisuelle et des usages dans les transports, pour la santé, etc. Cette technologie soulève également de nombreuses questions en termes d'industrie du futur.

Le 16 juillet 2018, le gouvernement et l'ARCEP ont rendu publique une feuille de route ambitieuse pour la France en matière de 5G. La feuille de route prévoit quatre grands objectifs : lancer plusieurs pilotes 5G sur une variété de territoires ; accueillir des premières

mondiales d'application de la 5G dans des domaines industriels ; attribuer des fréquences en 2020 dans une grande ville ; couvrir les axes de transport principaux en 2025.

Les quatre volets d'action de l'ARCEP se croisent avec ces objectifs : la libération et l'attribution des fréquences radio, la simplification des conditions de déploiement, la mobilisation des acteurs et la dynamisation de l'écosystème, enfin, l'amélioration du dialogue et de la transparence autour de l'exposition aux ondes électromagnétiques. Ce dernier et quatrième axe concerne pour l'ARCEP l'anticipation des réseaux du futur et l'information du public. Le comité prospectif sur les réseaux du futur a été mis en place il y a cinq mois. Le troisième axe sur la mobilisation des acteurs inclut notamment, pour nous, l'ouverture d'un guichet pilote depuis janvier 2018, ainsi que des actions de sensibilisation et de mobilisation pour favoriser l'émergence de nouveaux usages.

Le deuxième axe impliquera un point sur la fiscalité. Parallèlement, des réflexions avec les collectivités sur les bonnes pratiques en matière d'accès au mobile urbain sont engagées. Sur le premier axe, l'ARCEP a deux chantiers à ouvrir : d'une part, définir le plan de fréquences cible, c'est-à-dire la quantité et la planification des fréquences attribuées, d'autre part, se demander à qui les attribuer et quelles seront les obligations attachées aux licences.

Le 26 octobre 2018 a ainsi été lancée une consultation publique, ouverte jusqu'au 19 décembre. Nous avons accompli un effort particulier de pédagogie pour ne pas utiliser des termes trop spécifiques au secteur des télécommunications. L'objectif consiste à ouvrir cette consultation le plus largement possible en interrogeant les acteurs sur les usages à venir de la 5G et sur les conditions pour permettre leur émergence. Cette consultation aborde les questions de fréquence, d'évaluation des besoins en termes de largeur de bande, les problématiques de coexistence avec les utilisateurs existants, le potentiel d'obligations futures associées aux autorisations, notamment les obligations en matière de couverture ainsi que les obligations de nature à favoriser l'accès au spectre d'autres acteurs que les opérateurs, notamment pour des besoins professionnels spécifiques.

L'ARCEP proposera au gouvernement un appel à candidatures au second trimestre 2019. La consultation publique sera donc suivie d'une proposition concrète d'appel à candidatures en vue d'un déploiement commercial de la 5G en 2020.

Une comparaison européenne permet de constater que trois bandes sont visées par les équipementiers : celles des 700 mégahertz, 3,5 gigahertz et 26 gigahertz. La France n'est pas tellement en retard, car elle avait de l'avance sur la bande 700 mégahertz et notre calendrier semble adapté pour les deux autres bandes. L'Italie est le seul pays à avoir attribué les trois bandes de fréquences, il y a quelques semaines.

Des travaux d'approfondissement avec les acteurs, notamment les collectivités publiques, seront nécessaires et des travaux techniques auront lieu pour affiner le plan de fréquences cibles. Un certain nombre de réunions d'information menées avec le gouvernement permettront la définition d'usages ciblés.

Les questions sont différentes selon les bandes de fréquence considérées. La bande 700 mégahertz, déjà attribuée aux opérateurs, pourrait être utilisée pour la 5G, mais elle répond davantage aux besoins de la 4G. Sa capacité limitée ne lui permet pas d'offrir le débit annoncé pour la 5G. En revanche, elle offre l'avantage d'une latence réduite.

Les autres bandes font encore l'objet de questions dans le cadre de la consultation publique. Il est possible qu'elles soient attribuées l'an prochain. La bande 1 400 mégahertz ne permet que des communications en sens descendant de la station de base vers le terminal. Cette bande représente une augmentation de capacité de 90 mégahertz, mais très utilisée

pour des applications régaliennes sensibles, dont le contrôle des crues. Elle sera en 4G ou 5G du fait de sa petite taille. Elle pourra être couplée aux applications à venir.

La bande 3 400-3 800 mégahertz est plutôt une bande haute. Elle ne permet de couvrir que 90 % de la population, ce qui laisse penser qu'elle n'est pas adaptée pour couvrir tout le territoire. Il faut des bandes basses pour assurer la couverture à 100 %. En outre, cette bande est occupée actuellement par des utilisateurs gouvernementaux avec lesquels les discussions se poursuivent. Elle est également occupée par des opérateurs de boucles locales de radio. Des travaux importants doivent être menés pour étudier qui déplacer et comment faire cohabiter la 5G et ces réseaux. Les questions autour de cette cohabitation sont très complexes. Les fréquences de la 5G ne sont pas réservées à des liens montants ou à des liens descendants. Cette situation conduit à la nécessité que les réseaux émettent de manière simultanée, l'alternative consistant à avoir des bandes de fréquence différentes selon le sens et qui fonctionnent séparément.

La bande de 26 gigahertz est très directive, ce qui suppose d'avoir une ligne de vue et qu'il n'y ait personne sur celle-ci. Cette bande peut constituer une alternative à la fibre optique, mais pas partout étant donné que nul ne doit passer entre l'émetteur et le récepteur. Cette technologie est très adaptée aux États-Unis en raison de la structure géographique et de l'habitat. Le très haut débit fixe avec cette bande ne paraît pas évident en France. La consultation publique permettra d'améliorer la qualification de cette analyse. Nous imaginons donc davantage des usages de densification tels que des *hotspots*, notamment pour les entreprises. Nous n'avons pas reçu de demande d'expérimentation sur cette bande. Nous les appelons cependant de nos vœux. En outre, cette bande est associée à plusieurs projets de stations satellites en cours de traitement. En tout cas, vous voyez qu'il y aura beaucoup de travail d'ici l'attribution des bandes de fréquences.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Je vous remercie pour cette contribution. Nous avons encore beaucoup de questions à vous poser. Quel est le rôle de l'Agence nationale des fréquences ?

M. Gilles Brégrand. – Merci Monsieur le président. L'ANFR est un établissement public dédié au spectre, territoire invisible, mais crucial dans le monde actuel. Un très grand nombre d'activités économiques l'emploient. Toute activité sans fil y est associée. La 5G est une demande importante en termes de spectre, mais ce n'est pas la seule. Le spectre est une ville-champignon qui attire de nombreuses personnes.

La 5G est un sujet important, mais de nombreux usages doivent être abordés. Le *new space* concerne les connexions satellites en orbite basse, jusqu'à plusieurs centaines par constellation. Des drones, des voitures intelligentes et des trains fonctionnent de plus en plus avec des fréquences radio. Des bateaux seront aussi autonomes et intelligents. Les besoins en termes de sécurité sont croissants dans la police, la gendarmerie, la récupération des situations après les crues, les ouragans, etc. L'Agence propose régulièrement des évolutions du « plan d'occupation des sols des fréquences » au Premier ministre. Nous cherchons des optimisations en écoutant les acteurs pour améliorer leur répartition. Nous devons être diplomates vis-à-vis de nos homologues. Les bornes de fréquence de la 5G doivent être les mêmes en France et sur le reste du continent européen. Un travail important a été réalisé à ce niveau par l'Agence depuis plusieurs années. Nous devons aussi reprendre le contrôle de l'implantation de chaque site, puisque l'Agence autorise chaque site d'émission sur le territoire.

L'Agence prend environ, chaque semaine, 1 000 décisions de création, modification ou suppression de sites d'émission de fréquence. Durant cette réunion, j'ai indirectement pris plusieurs décisions d'autorisation de site parmi ceux qui ne gênent pas l'environnement et qui

sont conformes aux autorisations reçues des opérateurs de télécommunications, de l'aviation civile, des pompiers, etc. Nous sommes garants de l'exposition du public et nous avons la capacité d'exproprier les personnes qui se trouvent dans une bande de fréquence dont l'usage a changé. L'Agence peut, enfin, telle une banque, préfinancer l'expropriation et se faire rembourser par les utilisateurs, souvent les opérateurs de télécommunications.

Le spectre se décide à trois niveaux. La décision s'esquisse en premier lieu au niveau mondial, étant donné que la demande de 5G est émise par l'Union internationale des télécommunications (UIT) qui dépend des Nations Unies. Ensuite, l'harmonisation se déroule au niveau européen avec 48 pays du continent et une harmonisation plus intense au niveau de l'Union européenne. C'est à ce niveau que se situent les bornes 3,4-3,8 et 26 gigahertz. Au niveau national, les décisions sont entérinées et nous précisons les conditions des usages des acteurs nationaux.

Le spectre des fréquences est déjà très occupé. Ce n'est pas l'Amérique d'avant Christophe Colomb, mais plutôt l'Amérique du XIX^e siècle avec encore des espaces libres. La 5G consommera beaucoup de spectres, de l'ordre du gigahertz, c'est-à-dire tout ce que le XX^e siècle a occupé en termes de communications, en commençant par les bandes les plus basses. Il faut imaginer un aménageur du territoire confronté à la problématique de la création du quartier de la Défense dans les années 1950 et 1960. Il s'agissait de trouver de l'espace pour construire de nouveaux bâtiments. Une solution astucieuse aurait consisté à prendre de l'espace dans Paris *intra muros*, car cette zone est au centre des différentes voies d'accès. Il aurait fallu éventuellement raser la moitié de Paris pour que ce soit plus efficace. Mais il y avait des solutions pour construire des bâtiments de grande hauteur correspondant plus à la 5G, c'est-à-dire la tour Montparnasse et d'autres immeubles dans le 13^e arrondissement. Nous devons en quelque sorte trouver des zones où installer des quartiers d'affaires nouveaux, comme La Défense ou Val-de-Fontenay, correspondant aux bandes hautes de la 5G. Notre problème consiste à marier les bandes hautes, qui sont moins faciles d'accès et nécessiteront d'être viabilisées, et les bandes basses.

Les bandes de la 5G ont été préalablement évoquées par les autres intervenants. La bande C, la bande 3,4-3,8 gigahertz et la bande 26 gigahertz occupent pratiquement 3 gigahertz. Ce sont les bandes pionnières de la 5G. Les bandes vierges pour les opérateurs de télécommunications sont des bandes aujourd'hui déjà prises pour d'autres usages. Chaque bande de fréquence est liée à des usages installés. La bande 3,4-3,8 gigahertz est utilisée par la météo et des faisceaux hertziens du ministère de l'intérieur, la bande 26 gigahertz par la météo, la défense, l'espace, etc. Il faut organiser une expropriation dans des conditions satisfaisantes pour rendre ces bandes utilisables. Cette évolution est engagée. La bande 3,4-3,8 gigahertz est en cours d'affectation à l'ARCEP. Elle sera dégagée à temps pour les attributions de la 5G. L'Agence des fréquences dégagera ce mois-ci un gigahertz de la bande de 26 gigahertz.

Toutes les bandes basses sont destinées à évoluer en 5G. Les bandes 700 et 800 mégahertz sont déjà compatibles avec cette technologie. Les autres bandes seront prochainement harmonisées au niveau européen. Les bandes de 5G dans les bandes basses sont des bandes de couverture, donc de moindre capacité car plus étroites.

Il y aura de la 4G sur tout le territoire avec un débit un peu moindre. À terme, la 5G sera dans les bandes basses sur l'ensemble du territoire national. 24 sites sont d'ores et déjà autorisés en 5G au niveau expérimental. D'autres bandes sont actuellement en discussion au niveau mondial, comme les bandes 26 gigahertz qui sont d'une grande capacité. Ces bandes permettront des usages à faible portée. Elles seront stabilisées à la fin de la conférence

plénière sur les radiocommunications prévue dans un an en 2019. Elles seront ouvertes le moment venu.

La 5G consommera énormément de bandes de fréquence, environ 1 200 mégahertz sous les 6 gigahertz, soit un cinquième de la capacité totale des bandes basses. Le plan de développement pour atteindre cet objectif est considérable. Une capacité dix fois plus importante est en attente sur les bandes hautes, mais sous réserve d'avoir les antennes qui permettent d'exploiter ces bandes et suffisamment intelligentes pour pallier les problèmes liés aux obstacles physiques. Le grand nombre de bandes permet de maintenir les communications.

L'ANSES a un rôle en matière sanitaire et a un rôle de vérification du respect des seuils d'exposition : elle vérifie le niveau d'exposition au niveau ambiant et a un rôle de contrôle de l'exposition des terminaux, pour une centaine de terminaux analysés par an. Pour utiliser des fréquences hautes, la 5G offre des antennes moins ambiantes, mais plus focalisées. Nous passons d'un « néon » à un « projecteur », qui balaie l'assistance et diffuse des mégabits en fonction des besoins. Ces antennes modifieront l'exposition du public. L'exposition du public sera en moyenne moins élevée, mais elle sera plus élevée fugitivement pour la personne qui utilise toutes les capacités, par exemple pour lire une vidéo sur You tube en haute définition.

L'Agence a un rôle important de veille des valeurs limites de l'exposition du public. Dans le cadre des expérimentations en cours à Bordeaux et Marseille, nous travaillons avec les opérateurs pour contrôler l'exposition du public. Nous parlons également beaucoup avec les collectivités locales, qui sont très intéressées par la 5G, car elle représente pour elles un avantage concurrentiel, mais elles sont aussi soucieuses que l'exposition aux ondes soit bien maîtrisée.

Nous avons mis en place un comité national de dialogue, prévu par la loi, qui se réunira pour la première fois le mois prochain, puis régulièrement sous la présidence de Michel Sauvadé. Il permettra d'échanger sur divers sujets, dont la 5G. Nous nous réunissons avec les mairies concernées. L'Agence mesure, affiche ses mesures et fait en sorte que les seuils soient respectés. La 5G nécessitera de rédiger de nouveaux textes. La plupart des textes actuels sont plutôt conçus pour des bandes en dessous du gigahertz. Avec la 5G, ce sera la première fois que nous utiliserons des fréquences hautes au niveau terrestre, en particulier dans les villes, ce qui nécessite une mise à jour des textes, étant donné que jusqu'à présent ces fréquences étaient utilisées pour les satellites et les radars, des matériels sans obstacles. L'Agence doit mener ce travail à bien pour que tout soit prêt lors des appels à candidatures 5G.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Je souhaite saluer l'arrivée de notre premier vice-président Cédric Villani. Nous terminons la présentation des institutions publiques par l'ANSES.

M. Olivier Merckel, chef de l'unité d'évaluation des risques à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). – Merci Monsieur le président. Je vous remercie de donner l'opportunité à l'ANSES de rappeler son rôle d'accompagnement des développements technologiques, pour en identifier en particulier les éventuels impacts sur la santé. Les controverses associées au compteur Linky montrent l'importance de cette démarche, notamment en matière de transparence des expositions.

Les préoccupations associées au développement des technologies de communication sont bien connues. Elles font l'objet de nombreux articles de presse notamment. Elles ont trouvé une forme de caisse de résonance avec l'explosion du développement de la téléphonie mobile. Du milieu des années 1990 à la fin des années 2000,

de grands programmes de recherche nationaux ont ainsi été mis en place dans divers pays, notamment en Europe. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) diffuse depuis plusieurs années un agenda de recherche qui incite les laboratoires à orienter leurs recherches dans des directions données. Depuis 2011, l'ANSES publie chaque année un appel à projets de recherche sur les risques liés à l'exposition aux radiofréquences. Le mode de financement de cet appel à projets de recherche changera puisque la taxe additionnelle à l'imposition forfaitaire pour les entreprises de réseau devrait être supprimée selon le projet de loi de finances pour 2019. Nous prévoyons un remplacement de ces crédits par une subvention attribuée à l'Agence pour financer ces recherches.

Les agences d'évaluation des risques prennent en compte ces différents éléments pour fournir leurs conclusions afin de répondre aux questions communes sur les risques liés à l'usage du téléphone mobile. Même si les risques sont faibles, la question revêt une importance capitale car ils concernent des milliards d'utilisateurs.

Comment répondre à la question des risques ? Tout d'abord, il faut bien définir ce que nous étudions. Parler de l'impact de la 2G, 3G, 4G ou 5G n'a pas un grand sens du point de vue biologique et de la santé : il faut étudier dans le détail les technologies employées. Les fréquences associées à la 5G s'échelonnent de 700 mégahertz à 26 gigahertz. L'impact de ces rayonnements électromagnétiques n'est pas du tout le même en fonction des fréquences.

Les éléments importants sont la fréquence et l'intensité des rayonnements ainsi que leur forme temporelle, c'est-à-dire leur modulation, la durée, à savoir une exposition chronique ou extrêmement ponctuelle avec peut-être une focalisation sur l'utilisateur. Que cela signifie-t-il d'être exposé à long terme à des niveaux relativement bas ou élevés, mais de manière extrêmement ponctuelle ?

Je reviens sur la notion de fréquence et d'impact sur le corps humain. Plus on monte en fréquence, plus le corps humain devient opaque au champ électromagnétique. Dans les très basses fréquences, dont le transport d'électricité, nous sommes « traversés » par les ondes sans grande interaction, sauf pour les terminaisons nerveuses du corps. Les communications mobiles de l'ordre du gigahertz au moins transfèrent de l'énergie : le rayonnement électromagnétique peut chauffer les tissus et produire d'autres effets à des intensités inférieures. Aux alentours du gigahertz, les rayonnements pénètrent sur plusieurs centimètres, dont le cerveau, soulevant la question du lien possible entre l'exposition au téléphone mobile posé près de la tête et les tumeurs au cerveau. En montant davantage en fréquence, la pénétration est beaucoup moins bonne pour les bâtiments comme pour le corps humain. À 20, 30 ou 40 gigahertz, il n'y a quasiment plus de pénétration dans le corps et l'essentiel de l'énergie est absorbé au niveau de la peau. La 5G ne doit donc pas être considérée comme un tout, mais il faut bien étudier le niveau d'exposition en fonction des fréquences utilisées.

Notre objectif est la compréhension des mécanismes d'interaction potentiels entre les champs électromagnétiques et le vivant, avec par exemple des cultures cellulaires. Nous cherchons à comprendre comment les rayonnements interagissent avec le fonctionnement biologique qu'il s'agisse de la peau, du cerveau ou d'autres organes. Nous travaillons aussi, plus globalement, sur les organismes, les animaux ou l'homme, pour tenter d'étudier si nous associons le développement de certaines pathologies à plus ou moins long terme à ces champs électromagnétiques.

Le 1^{er} novembre 2018, le *National Toxicologic Program* (NTP) américain a publié les résultats finaux de son étude sur le caractère cancérigène des radiofréquences. Ce programme représente un budget de 25 millions de dollars, dix ans d'études et 1 200 rats exposés durant leur vie entière afin d'analyser un impact des radiofréquences à différents niveaux d'exposition. Les conclusions du NTP parlent d'un risque évident de cancer associé aux

champs électromagnétiques pour des rats mâles exposés à des ondes à intensité relativement élevée. Les agences sanitaires doivent confronter ces résultats à d'autres études conduites pour en déduire des conclusions sur la santé humaine. En effet, transposer le résultat de ces études à l'homme n'est pas simple.

Une autre étude importante à considérer concerne les études en population. Le Centre international de recherche sur le cancer a classé, en 2010, les radiofréquences parmi les cancérigènes possibles pour l'homme, notamment sur la base des études épidémiologiques qui ont mis en évidence la possibilité d'un risque plus élevé de tumeurs du cerveau pour les grands utilisateurs de téléphone mobile. Nous parlons de « possibilité ». Nous n'avons donc pas de certitude quant à l'association entre l'exposition au téléphone mobile et un risque avéré pour les personnes, notamment en matière de cancer.

L'ANSES s'est intéressée à divers aspects des champs électromagnétiques sur l'ensemble du spectre, des basses fréquences aux hautes fréquences, dont le compteur Linky. Notre rôle consiste à combiner toutes les études et à en tirer des conclusions utilisables par les pouvoirs publics. La diversité des résultats des études disponibles et les niveaux de preuve non tranchés présentent une difficulté conséquente. Il n'est donc pas possible d'avoir une position définitive. Certaines études mettent en évidence des effets sur la santé. Des effets biologiques ont été observés, mais aucune preuve d'un risque certain n'a été constatée sur l'homme en matière de cancérogénicité.

En ce qui concerne la 5G, il est fondamental de distinguer les bandes de fréquence et la nécessité de se préoccuper des expositions. La feuille de route pour la 5G mentionne, comme quatrième axe, la transparence et le dialogue sur les déploiements et l'exposition du public. C'est par ce biais que nous accompagnerons le développement technologique pour en comprendre les impacts sur l'exposition et la santé. L'Agence ne pourra pas travailler sur ces questions sans données. Nous avons impérativement besoin de données précises, de la part des opérateurs et des constructeurs d'antennes, sur l'exposition, la durée d'exposition et les technologies des antennes. Nous travaillons avec l'ANFR et la Fédération française des télécommunications pour organiser le recueil des données que nous devons récupérer pour travailler efficacement.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Je vous remercie. Nous allons maintenant vous questionner, attendre vos réponses, pour ensuite répandre la bonne parole.

M. Pierre Ouzoulis, sénateur. – Je vous remercie pour ces différentes présentations parfaitement compréhensibles. Je souhaite faire une remarque en tant qu'archéologue et historien des techniques. Mon métier m'a habitué à étudier les ruptures qualitatives dans les évolutions technologiques. Vous avez très bien montré que la révolution essentielle du mobile consiste à avoir adopté un système d'organisation de transfert de données par cellule.

Pour la 5G, le modèle d'organisation spatiale est inchangé, mais un nouveau mode qui permet aux agents d'entrer en communication quasiment sans intermédiaire voit le jour. Cette évolution peut-elle induire un changement qualitatif ? Nous allons de plus en plus confier à des objets le soin de nous donner des informations sur notre environnement. Nous transférons donc une partie de notre sensibilité à des outils. La question que je me pose, en tant que politique, est celle de la défense des droits individuels. Le Sénat a réfléchi à plusieurs reprises à la question des objets connectés. Quel est l'apport des nouvelles technologies à nos facultés cognitives ? La contemplation quotidienne des réseaux sociaux ne révèle pas un saut qualitatif affirmé en la matière.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – J'ai découvert le cellulaire il y a longtemps avec la logique de réutilisation de fréquences. Ai-je bien compris que la cellule 5G permet d'avoir des sous-cellules, et des communications par exemple de véhicule à véhicule ou par des antennes directionnelles ?

M. Marceau Coupechoux. – Je peux répondre en partie à cette question. Les communications de terminal à terminal ne constituent pas, à mon avis, une révolution. Vous avez déjà ce type de communication avec le Bluetooth et le WiFi. La nouveauté est de l'avoir introduite dans les réseaux cellulaires.

Dans le domaine de la radio, la révolution majeure concerne l'usage des MIMO, c'est-à-dire des antennes multiples. La technologie MIMO permet de dépasser l'algorithme de Shannon. La nouvelle borne de traitement du signal développé dans les années 2000 tient compte de ces types d'antennes, ce qui représente une révolution scientifique. Ce dont nous parlons est un nouveau standard qui sera déployé en 2020. Tout est connu. Les évolutions scientifiques sont connues. Nous parlons simplement de les standardiser et de les déployer, dans le grand public et dans l'industrie. Nous savons depuis longtemps que plus nous avons de cellules, plus la capacité du réseau est importante. La gestion de certaines interférences pose problème, étant donné qu'elles deviennent plus importantes. Il s'agit surtout d'un défi algorithmique.

Un réseau hiérarchique plutôt que plat vise à éviter les différences de propagation entre les différentes zones. Il s'agit de s'assurer que le mobile affiche partout le bon nombre de « barres » représentant la qualité de l'accès au réseau. Dans les zones plus denses, la petite cellule offre un débit important en complémentarité.

M. Alain Pouyat. – Le schéma est en trois dimensions. Les cellules ombrelles assurent la couverture, tandis que d'autres cellules assurent le trafic. Les interactions entre les différentes cellules, notamment entre les bandes basses et hautes, sont problématiques, on le voit depuis la 3G.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Je vous remercie. Je suis désolé d'être arrivé si tard. J'entends des observations extrêmement intéressantes sur lesquelles j'aimerais réagir. En premier lieu, qu'est-ce que la puissance publique peut apporter dans le déploiement de la 5G ? Faut-il insister sur l'accès aux données techniques comme on l'a entendu dans l'exposé de l'ANSES ? Faut-il, le cas échéant, forcer les études statistiques et les études relatives au déploiement, par exemple en vue de la ville connectée ? Faut-il travailler sur les normes en matière de sécurité ? Nous avons abordé à plusieurs reprises dans les travaux de l'Office la question de la sécurité des objets connectés. Ce domaine a besoin de se renforcer en termes de normes, sans que cela soit un frein pour le développement de l'innovation.

M. Olivier Merkel. – Le sujet majeur pour l'évaluation des risques de la 5G sur la santé ne concerne pas tant les données biologiques. Les scanners corporels utilisent des fréquences proches de la bande la plus haute à près de 24 gigahertz. Le sujet primordial consiste à anticiper le déploiement de la 5G. Nous sommes en mesure de respecter la confidentialité de certaines données, qui peuvent être encadrées par le secret industriel et commercial. Il faut pouvoir étudier quelles antennes seront installées, quels gains sont générés par ces antennes pour simuler des situations d'exposition, etc. Il faut donc construire des scénarios et comprendre comment seront utilisées ces expositions pour améliorer la connaissance de ces dernières. Les expositions dépendront entièrement de l'infrastructure du réseau.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Qui signe le contrat lorsqu'un opérateur veut déployer un nœud à tel ou tel endroit ? Qui donne l'autorisation ?

M. Gilles Brégand. – L'autorisation pour le déploiement des antennes relais est accordée au niveau de la commune, par une déclaration de travaux ou par une demande de permis de construire. L'Agence des fréquences examine de son côté l'insertion de la fréquence dans l'ensemble des fréquences qui l'environnent, en lien avec les autorisations données par l'ARCEP. Le relais peut être mis en service une fois que les deux autorisations, permis de construire et électromagnétique, sont accordées.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – L'installation dépend-elle d'un simple contrat entre l'opérateur et le propriétaire ?

M. Michel Combet. – L'implantation d'une antenne dépend de la manière dont le pylône est installé. Il faut avoir un bail ou acheter un terrain. Un bail est nécessaire pour l'installation ou l'ajout d'une antenne, par exemple pour évoluer d'une antenne 4G à une antenne 5G. D'autres entités peuvent intervenir, avec, par exemple, l'avis des architectes des Bâtiments de France dans un secteur classé. Les acteurs publics, locaux ou nationaux, interviennent à différents stades de l'implantation des antennes. Nous avons tenté de simplifier le nombre d'intervenants à travers des démarches auprès de l'Assemblée nationale et du Sénat. La France connaît le délai le plus long pour les implantations d'antennes. Il faudrait essayer de s'assurer que tout le monde partage les informations que nous donnons afin d'éviter la déperdition d'énergie dans des tâches administratives.

M. Gilles Brégand. – Pour répondre à la question initiale de Cédric Villani, il faut mettre en perspective la question de la 5G avec celle qui est déjà ouverte depuis le mois d'octobre 2018 par Verizon aux États-Unis. Elle est expérimentale dans plusieurs pays d'Asie. Le Japon affiche que les JO 2020 seront sous 5G. Il y a eu des tests de 5G lors des jeux olympiques d'hiver en Corée du Sud. Les expérimentations 5G qui commenceront prochainement en France à travers 24 antennes ne seront pas les premières. Les constructeurs mettent ensemble des éléments différents. Les antennes intelligentes avec focalisation des faisceaux sont connues depuis 20 à 25 ans. Elles sont utilisées par les radars par exemple, ils ne tournent plus sur eux-mêmes depuis longtemps.

La technologie des antennes intelligentes connue depuis les années 1980 sera mise en œuvre de manière systématique dans le cadre de la 5G. Le déploiement de la 5G commence avec une compétition entre différents pays. La 5G offre un service différent du domaine classique des télécommunications car une nappe de télécommunications sera ouverte à de nombreux domaines verticaux : usines, voitures, télémédecine, etc. La 5G est un capaciteur de nombreux domaines. C'est un grand chapiteau réunissant des acteurs très divers de l'automobile, des réseaux ferrés, de la médecine, etc. De nombreux usages de la 5G seront présents dans l'environnement car cette technologie équipera de nombreux appareils.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Y a-t-il un risque de voir apparaître une position dominante sur le plan scientifique, technologique ou logiciel, en termes de 5G, nous plaçant dans une situation de dépendance économique ?

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Je suis médecin rural. J'ai été très attentive à l'expérimentation 5G menée à Bordeaux. Je suis bordelaise et surtout girondine. Des discussions importantes se déroulent pour savoir si le département deviendra une métropole. J'ai commencé mon activité de sénatrice en visitant des maisons de santé performantes, mais éloignées des villes. Lorsque nous faisons 30 kilomètres sans que le téléphone fonctionne, on se demande comment la télémédecine fonctionnera dans ces territoires reculés. Je défends la ruralité à cet égard. Avec le prix Goncourt 2018, attribué hier, on reparle de la France

périphérique. L'installation de la 5G ne risque-t-elle pas d'attirer davantage les élites en ville et donc de ne pas profiter à la télémedecine ?

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – De nombreux territoires font des efforts dans le déploiement de la fibre optique dans chaque commune et dans chaque maison. N'y a-t-il pas un risque d'équipement redondant avec la 5G ?

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Ce déploiement est prévu pour toute la Gironde en 2024, et le conseil départemental est très investi.

M. Michel Combet. – Nous ne voyons pas de dépendance technologique à ce stade. Nous cherchons, au contraire, à maintenir la pluralité d'approvisionnement. La 5G permettra aux industries de se développer sur le territoire mais aussi à l'étranger. Sur le sujet de la couverture 4G et de l'accusation portée à l'encontre de la 5G sur le fait d'aggraver les problèmes de couverture, je rappelle que la 5G permettra d'apporter des services nouveaux en fonction des applications. Les opérateurs se sont engagés au début de l'année 2018 à développer la couverture 4G à l'horizon 2020/2022. Cela permettra de s'assurer que la couverture s'améliore et qu'il n'y a pas à résorber la fracture entre zones denses et zones non denses et de préparer l'arrivée de la 5G dans les endroits les plus pertinents. Le développement de la télémedecine sera possible grâce à la fibre optique et à la 4G. La 5G sera plutôt utilisée pour la téléchirurgie, qui impose d'avoir des délais de latence très faibles. L'enjeu consiste à éviter que la 5G soit un facteur aggravant. Cette technologie doit à l'inverse permettre d'effacer les distances.

M. Alain Sibille. – La 5G arrivera progressivement en deux phases principales. La première phase de *no stand alone* consiste à greffer la radio sur le cœur 4G existant. La version ultérieure permettra d'accéder à tous les services les plus avancés. Cette évolution se déroulera dans le temps.

Mme Anne Laurent. – En ce qui concerne la couverture en 4G, les maisons de santé, les hôpitaux, les aéroports, ports, entreprises ou campus ne sont pas nécessairement couverts en priorité par la 4G, mais ils le deviendront pour les nouveaux usages de la 5G. La consultation publique vise à répondre aux besoins de couverture de ce type de structures, notamment en fixant l'obligation pour les opérateurs de répondre aux demandes raisonnables de déploiement du réseau ou d'accéder directement aux fréquences 5G.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Je ferai deux remarques. La première concerne la taxe affectée qui sert à financer des études relatives à l'impact de l'exposition aux ondes électromagnétiques, et qui a disparu du projet de loi de finances pour 2019, dans le texte issu du vote de l'Assemblée nationale en première lecture. J'attire votre attention sur le fait que, sensibilisé sur ce sujet, j'ai demandé que cette taxe soit maintenue. Il n'est pas pertinent en principe dans l'orthodoxie budgétaire d'utiliser des taxes affectées, mais si c'est un moyen de conserver une ligne budgétaire qui, sinon, risque de disparaître en raison d'un montant circonscrit, cela ne semble pas négatif, au contraire. Un amendement visant à la maintenir a été déposé tardivement avec quelques signataires dont aucun ne pouvait cependant être présent le jour de sa discussion.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – C'est l'intérêt du bicamérisme de permettre une lecture par l'autre assemblée.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – C'est en effet intéressant si le Sénat peut reprendre ce combat, s'il le juge souhaitable. À nous de convaincre le gouvernement du bien-fondé de cette opération.

La dépendance économique ne se situe-t-elle pas dans la relation entre l'infrastructure de communication et les acteurs du numérique ? Sous couvert de la neutralité

du net et de son corollaire en termes de partages d'informations, les grands groupes du numérique ont profité des infrastructures déployées par les entreprises de télécommunications sans avoir à en payer le prix.

La question est d'autant plus saillante qu'il y a une grande concentration des acteurs dans le secteur du numérique, ce qui n'est pas le cas dans le secteur des télécommunications.

M. Michel Combet. – Notre position a toujours été précise sur ce sujet des « tuyaux », qui est une question sociétale. Notre secteur est confronté à la question de la valeur d'internet et de son accès. La France était encore récemment à la pointe de ce combat d'équité réglementaire et fiscale. Ces deux secteurs ne jouent pas avec les mêmes règles. Les opérateurs télécom sont parmi les industries les plus régulées, scrutées et contrôlées. Nous manions des données en provenance de nos clients. Les règles sont en plus parfois remises en cause par la Cour de justice de l'Union Européenne. Cette démarche s'inscrit dans une vision globale. Nous sommes très heureux que la France se situe à la pointe de ce combat qui n'est pas terminé. Ce que font les opérateurs avec les données de leurs clients est scruté très attentivement, cela continuera demain avec la 5G avec des données des usagers, mais aussi des équipements sur l'ensemble du territoire.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Nous avons donc des perspectives technologiques imminentes. Il appartiendra aux commissions des affaires économiques de l'Assemblée nationale et du Sénat d'étudier les enjeux économiques associés à la 5G en termes d'aménagement du territoire et de risques économiques ou de positions dominantes, voire de passagers clandestins qui profiteraient des efforts des autres. Nous parlerons à nos collègues, enrichis de la science que vous nous avez apportée ce matin. Ce sujet est immédiat, incontournable et puissant.

II. COMPTE RENDU DE LA REUNION DU 6 DECEMBRE 2018 PRESENTANT LES CONCLUSIONS DE L'AUDITION PUBLIQUE DU 8 NOVEMBRE 2018

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Le 8 novembre dernier, nous avons organisé une audition publique sur les enjeux et les perspectives technologiques ouvertes par la 5G, autour de trois chercheurs et de représentants des organismes publics concernés : l'Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes (Arcep), l'Agence nationale des fréquences (ANFR), l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) et la Fédération française des télécoms (FFT). Pierre Henriët, député, qui y était associé, va nous en présenter les conclusions.

M. Pierre Henriët, député, rapporteur. – La cinquième génération de standards de téléphonie mobile, dite 5G, est annoncée comme une innovation de rupture. Face à un certain emballlement, vos rapporteurs ont voulu identifier les enjeux technologiques réels derrière le concept quelque peu commercial de « révolution 5G ».

Les standards de téléphonie mobile ont pour origine le travail de normalisation effectué par l'Union internationale des télécommunications (UIT), agence des Nations unies spécialisée dans les technologies de l'information et de la communication. L'UIT s'appuie sur un groupe chargé des questions techniques et d'exploitation relatives aux radiocommunications. En 2013, ce groupe a commencé à préparer un nouveau standard IMT – *International Mobile Telecommunications* – appelé IMT-2020, comme il l'avait fait dans les années 2000 pour définir la 4G, qui porte le nom de standard IMT Advanced. L'UIT s'appuie sur un regroupement mondial d'organismes de standardisation en télécommunications, appelé le 3GPP – 3rd *Generation Partnership Project*.

La norme IMT-2020, ou 5G, répond à la question des limites de la 4G, tout en se situant dans le prolongement de celle-ci : elle ne correspond pas à un saut technologique de grande envergure. Il s'agit d'évoluer dans la continuité afin de relever les défis posés par les limites du standard actuel, qui sont l'engorgement des réseaux dans des zones à trafic ponctuel élevé, comme lors de grands rassemblements, l'incapacité à fournir un accès aux réseaux à une grande quantité d'objets connectés et l'existence de délais de latence.

Les technologies mobiles ont évolué au rythme des innovations technologiques et des demandes sociales : le déploiement de la 5G devrait ainsi accompagner l'ultra-connectivité de la société. La cinquième génération de standards de téléphonie mobile ira plus loin qu'une simple augmentation des débits. L'impact devrait être important non seulement en termes techniques, mais aussi pour l'économie et la société.

L'Office n'a pas souhaité aborder toutes les questions posées par la 5G. Les réseaux mobiles sont de plus en plus au cœur du quotidien de nos concitoyens, ce qui pose de nombreuses questions politiques, économiques, sociétales et de cohésion territoriale, notamment autour de leurs usages. Il incombera aux commissions des affaires économiques et du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée nationale et du Sénat d'étudier précisément ces enjeux.

La connexion 5G en ultra haut débit permettra plus qu'une simple amélioration de la qualité de diffusion des vidéos en ultra haute définition ; elle garantira la couverture de besoins spécifiques dans des secteurs variés ainsi que les usages liés à l'internet des objets. Les communications entre une grande quantité d'objets connectés devraient être facilitées, dans le cadre de réseaux plus fiables, avec une très faible latence. L'innovation introduite par la 5G se situe d'abord à ce niveau : permettre des communications massives, quasiment en temps réel, grâce à l'optimisation des bandes de fréquence par des modulations numériques plus

complexes et un meilleur pointage des faisceaux. Ces avancées doivent conduire à assurer la couverture de besoins spécifiques dans des secteurs parfois critiques. Je pense à l'énergie, tant au niveau de la production, du stockage que du transport d'énergie lui-même ; à la santé, avec la question des diagnostics médicaux et des opérations à distance en temps réel ou téléchirurgie ; et aux transports, parce qu'ils demanderont, à l'heure des véhicules autonomes, des temps de réaction très courts, surtout en cas d'accident. D'autres secteurs, comme les médias ou l'industrie, tireront profit de la 5G. La réalité virtuelle comme la réalité augmentée seront, en outre, facilitées.

Les initiatives pour développer la 5G sont nombreuses. La France s'oriente vers l'adoption de ce nouveau standard. En juillet 2018, a été publiée la feuille de route 5G de la France et le programme de travail correspondant de l'Arcep. Des expérimentations sont en cours depuis cet automne et une consultation publique sur l'attribution des bandes de fréquence vient d'être ouverte. En 2019, l'appel à candidatures pour les attributions de fréquences sera lancé.

Les incertitudes sont nombreuses quant au choix des bandes de fréquences, dont le spectre est très congestionné. Trois bandes sont envisagées, toutes au-dessus de la limite supérieure de la très haute fréquence, qui est de 300 mégahertz : 700 mégahertz ; 3,5 gigahertz et 26 gigahertz. Chacune d'entre elles présente des spécificités : la première a l'avantage d'une latence réduite, mais présente une capacité limitée ; la seconde ne peut pas couvrir tout le territoire et imposera de recourir en complément à des bandes basses pour assurer une couverture plus complète ; la troisième est très directive et ne fonctionne donc qu'en l'absence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, ce qui convient davantage à la structure géographique et à l'habitat des États-Unis qu'à ceux de la France.

Ces trois bandes de fréquences sont déjà occupées, notamment par des utilisateurs gouvernementaux qui travaillent sur l'espace, la météorologie ou dépendent du ministère de l'intérieur ou de celui de la défense. Il faudra donc faire cohabiter la 5G avec ces réseaux ou les exproprier, puis les faire déménager au sein du spectre. Les choix à opérer sont complexes, car il faudra maximiser la mobilisation de la bande passante disponible et harmoniser ces choix au niveau international, ou au moins européen. La 5G ne va pas faire disparaître la 4G : ces réseaux vont coexister et, dans un premier temps, la 5G servira surtout à désengorger les réseaux 4G, qui saturent dans les zones de densité importante et à haut niveau de trafic. Après cette amélioration des performances, des changements qualitatifs pourront intervenir dans un deuxième temps autour de nouvelles fonctionnalités pour nos sociétés. Elles concerneront, en particulier, les usages liés au temps réel et à la gestion des objets connectés.

Les investissements pour les réseaux d'infrastructures seront importants. Des travaux seront nécessaires pour évoluer d'une antenne 4G à une antenne 5G. Ils sont toutefois à relativiser parce que le même support pourra être utilisé simultanément au travers de cellules dites multitechnologiques et parce qu'une grande partie des progrès en la matière seront virtualisés, c'est-à-dire qu'ils passeront plus largement par des couches logicielles que par des couches physiques. Ces investissements, tout type de réseaux confondu, ont d'ailleurs représenté, pour les opérateurs de télécommunications, 10 milliards d'euros pour les services fixes et mobiles en 2017, dont trois milliards d'euros pour les seuls mobiles. Cette virtualisation impliquera une certaine vigilance en termes de sécurité des réseaux.

Les préoccupations associées à l'exposition des particuliers aux ondes électromagnétiques des radiofréquences seront de plus en plus grandes à mesure que se développeront ces technologies, d'autant que l'impact de ces dernières sur la santé continue de faire l'objet de débats scientifiques. Les études menées ont reconnu les radiofréquences comme cancérogènes possibles, mais les effets biologiques observés n'ont pas encore apporté

la preuve d'un risque certain sur l'homme en matière de cancérogénicité. Il faut noter, de plus, que les fréquences hautes, dont certaines seront utilisées par la 5G, pénètrent moins le corps humain, ce qui peut sembler, *a priori*, rassurant. Ces préoccupations légitimes appellent une plus grande transparence, afin de permettre un déploiement dans un climat de confiance.

En conclusion, l'Office formule les recommandations suivantes.

En matière de santé publique, il faut que le monde de la recherche, et en particulier l'Anses, dispose de données précises émanant des opérateurs et des constructeurs d'antennes, tant sur l'exposition et la durée d'exposition que sur les technologies utilisées par les antennes. Il convient aussi de garantir le financement de l'appel à projets de recherche de l'Anses sur les risques liés à l'exposition aux radiofréquences ; de poursuivre les expérimentations 5G en cours et de lancer dès 2019 des pilotes 5G « grandeur nature » ; et, enfin, de conduire des travaux de concertation avec les collectivités territoriales et les entreprises pour favoriser la mutualisation des réseaux et des conditions d'accès spécifiques au réseau 5G pour certains usages ciblés.

M. Bruno Sido, sénateur. – C'est la première fois que j'entends dire que les radiofréquences sont reconnues comme cancérogènes possibles. Il me semble au contraire que toutes les études montrent qu'elles n'ont pas d'effet.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-président de l'Office. – Notre Office a fait un rapport sur la question.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Il s'agit peut-être d'un reclassement de leurs résultats... À moins que la confusion ne résulte de la divergence entre les expériences menées en laboratoire et les données épidémiologiques.

M. Pierre Henriët, député, rapporteur. – Cette expression est utilisée depuis quinze ans, mais on n'est jamais passé à l'idée d'un risque certain.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – On constate que les cellules exposées présentent des effets induits, mais, en termes d'épidémiologie, on n'a pas décelé d'indices d'une prévalence supérieure du cancer.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Nous en avons parlé le 31 mai dernier. Il semble que les expériences menées sur des rats ou des souris révèlent des effets cancérogènes, mais elles ne sont pas transposables à l'homme, et les intensités d'exposition sont bien supérieures à celles auxquelles nous sommes soumis. Le doute persiste, néanmoins, sur l'effet du téléphone, et *a fortiori* de la 5G. Mon amendement concernant le financement de l'appel à projets de recherche de l'Anses n'a hélas pas été retenu par la commission des finances, car le Gouvernement considère apparemment que la hausse de 18 % de la subvention est suffisante pour l'Anses.

M. Pierre Henriët, député, rapporteur. – En 2011, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a reconnu les champs électromagnétiques de radiofréquence comme pouvant être cancérogènes pour l'homme. Il se peut que l'utilisation d'un téléphone sans fil accroisse le risque de gliome, qui est un cancer malin du cerveau.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Le Circ a pris part à la controverse sur le glyphosate et considère aussi le café et le thé comme des cancérogènes possibles... La question est de savoir ce qu'il entend par « possible ». Cela ne signifie pas que la substance peut déclencher un cancer, mais il y a des indices suggérant qu'il peut exister un mécanisme la liant à un déclenchement de cancer.

M. Pierre Henriët, député, rapporteur. – Peut-être pourrions-nous mentionner, en note, cette publication du Circ ?

M. Bruno Sido, sénateur. – Je vous posais la question parce que cette mention sera certainement remarquée et pourrait relancer une polémique embarrassante.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Nous pouvons aussi renvoyer au rapport sur l'effet des radiofréquences publié par l'Anses et salué par toutes les parties comme un modèle du genre.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Ou écrire que les études en question ont été faites sur des animaux.

Mme Angèle Préville, sénatrice. – Ne faudrait-il pas préciser par qui les études mentionnées ont été menées ?

Mme Annie Delmont-Koropoulis, sénatrice. – Il serait tout de même bon d'écrire qu'il s'agit d'études conduites sur l'animal.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Cela laisserait penser qu'un mécanisme identique est possible chez l'homme. Tout est dans le sens de cet adjectif... Pour être précis, il faudrait renvoyer à l'étude de l'Anses.

Il en est ainsi décidé.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – De mes discussions avec les opérateurs, j'ai retenu que, si la 5G est au point sur le plan technique, sa mise en œuvre sera délicate. Il faudra d'abord s'assurer de sa compatibilité avec la 4G, car les premières applications 5G utiliseront le réseau 4G. La 5G pourra transmettre beaucoup plus d'informations, à condition toutefois que les équipements soient considérablement renforcés. En particulier, le nombre de points d'émission devra être augmenté, et chacun émettra moins. Cela demandera un effort très important à la puissance publique.

M. Pierre Henriot, député, rapporteur. – Ces questions ont été soulevées pendant l'audition, et ce sont les commissions des affaires économiques de nos deux assemblées qui auront à y réfléchir.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Il ne faut pas laisser entendre que, là où la 4G ne passe pas, la 5G passera, car cela susciterait des espoirs qui seront déçus.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Tout dépendra des installations.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Dans les zones mal desservies, rien ne changera.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – En effet.

Mme Florence Lassarade, sénatrice. – Dans certaines zones, la 5G coûtera très cher à installer par rapport au service qu'elle apportera.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Une rencontre sur la 5G a été récemment organisée à l'Assemblée nationale avec des représentants des opérateurs. Le débit sera entre dix et mille fois supérieur, selon les applications, à celui de la 4G. La directionnalité sera plus précise, ce qui permettra des intensités plus faibles. Mais le besoin de couverture sera bien plus fort, nous disent les opérateurs ; la puissance publique n'a pris aucun engagement chiffré pour le moment.

Les très hautes fréquences, à 26 gigahertz, ne pourront pas être mises en œuvre sans de nouvelles antennes. L'enjeu est donc la quantification du niveau de prestation recherchée, ce qui nous renvoie aux problématiques de développement et de cohésion de nos territoires.

Mme Angèle Prévile, sénatrice. – Cela concerne non seulement les commissions des affaires économiques, mais aussi les commissions du développement durable et de l'aménagement du territoire.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – En effet. D'ailleurs, au Gouvernement, ces sujets sont davantage portés par M. Denormandie, ministre auprès de la ministre de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, chargé de la ville et du logement, que par le ministère de l'économie.

Mme Catherine Procaccia, sénateur. – Au Sénat, la commission des affaires économiques ne s'est pas encore saisie du sujet.

M. Pierre Henriot, député, rapporteur. – Tous les parlementaires sont intéressés par les territoires.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Nous pourrions ajouter une phrase de conclusion pour préciser qu'il convient de prendre en compte aussi bien les enjeux technologiques que ceux qui sont liés à l'aménagement et à la cohésion des territoires.

Il en est ainsi décidé, et la publication du rapport d'information présentant les conclusions de l'audition publique sur les perspectives technologiques ouvertes par la 5G est autorisée.

ANNEXES

Annexe 1 :
Présentation de M. Alain Pouyat, Président de Diginotech,
membre de l'Académie des technologies



ALAIN POUYAT



Aux origines de la cinquième génération des réseaux mobiles

Date	Génération	Sigle	Nom	Débits Théorique/utile
1981	1G	R 2000	Radiocom 2000	analogique
1992	2G	GSM	Global System for Mobile	9 kbps
	2,5G	GPRS	Global Packet Radio Services	170 kbps/30
	2,8G	EDGE	Enhanced Data Rate	384 kbps/240
2001	3G	UMTS	Universal Mobile Telco Syst	384 kbps/300
	3G+	HSPA	High Speed Packet Access	14,4 Mbps/3,6
	3G H+	HSPA+		21 Mbps/5
	3G H+DC	DC HSPA+	Dual Cell HSPA	42 Mbps/10
2012	4G	LTE	Long Term Evolution	80 Mbps/60
	4G+	LTE advanced		400 Mbps/300
2020	5G BF			1 Gbps
	5G HF			> 10 Gbps

Véhicule autonome : quelles liaisons entre la voiture et l'infrastructure?

Qui dit véhicule autonome dit véhicule communicant ! Les voitures sans conducteur devront nécessairement interagir avec l'infrastructure routière pour rouler sans intervention humaine en toutes circonstances.

Le véhicule autonome devra-t-il s'adapter aux routes existantes ou l'infrastructure routière sera-t-elle repensée pour permettre la circulation de véhicules sans conducteur ? Les deux, sans doute ! Mais pendant la période de transition [d'une conduite de plus en plus assistée à une conduite totalement autonome \(d'un niveau 1 aux niveaux 4 et 5\)](#), les véhicules devront largement s'appuyer sur la communication avec l'infrastructure pour opérer en toute sécurité.





Annexe 2 :
Présentation de M. Alain Sibille, Professeur à Télécom ParisTech



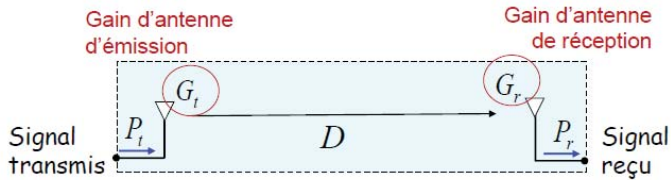
Problématiques technologiques de la transmission des signaux 5G

Alain Sibille
 Professeur, Télécom ParisTech
 Secrétaire général, URSI-France



Fondamentaux des communications sans fil

■ Liaison radio



Equation des télécommunications

$$\frac{P_r}{P_t} = \underbrace{G_r \cdot G_t}_{\text{Impact des antennes}} \cdot \underbrace{\left(\frac{c}{4\pi D F} \right)^2}_{\text{Impact de la propagation}}$$

Graphique de P_r en fonction de F : la puissance reçue diminue lorsque la fréquence augmente.





Fondamentaux des communications sans fil

■ Formule de Shannon

Capacité en bits/s

$$C = \overbrace{B}^{\text{Largeur de bande (Hz)}} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\overbrace{P_r}^{\text{Puissance reçue}}}{\underbrace{P_{\text{bruit}}}_{\text{Bruit électronique dans le récepteur}}} \right)$$

Efficacité spectrale :

$$\frac{C}{B} \text{ en bits/s / Hz}$$





Fondamentaux des communications sans fil

■ Problématiques des réseaux sans fil

- Propagation difficile à haute fréquence, blocages, directionnalité

— Ex. puissance reçue 100 fois plus petite de 3 GHz à 30 GHz

— Ex. passage d'une personne devant un faisceau à 60 GHz

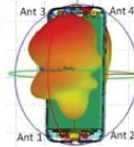
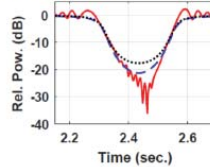
— Pénétration en intérieur très difficile

— Nécessité d'orienter les antennes dans la bonne direction

- Performance antennes / circuits (pertes)

— Cas des terminaux à antennes intégrées

— Cas des antennes des stations de base



Fondamentaux des communications sans fil

■ Problématiques des réseaux sans fil

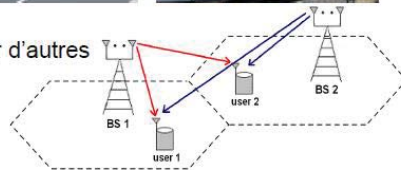
- Terminal mobile : variation rapide du signal (Doppler)



- En réception, interférences par d'autres émetteurs (même fréquence)

- Dissymétrie liaison montante / descendante

- Latence limitée par la vitesse de la lumière ($< 300\,000\text{ km/s}$)

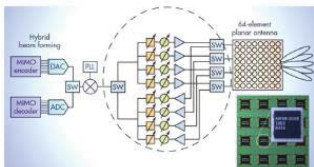




Progrès technologiques en émergence

■ Antennes multi-éléments (→ MIMO, MIMO massif)

- pointage de faisceau émetteur <> récepteur
- Meilleure captation de puissance par le récepteur
- Robustification du signal en réception
- Moindre consommation
- Surcroît de capacité (liaisons multi-utilisateurs)





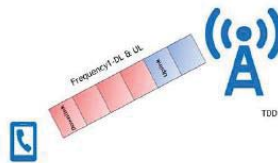
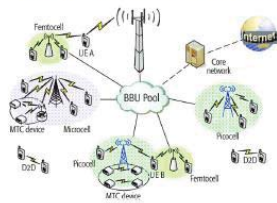
Progrès technologiques en émergence

■ Montée en fréquence

- Disponibilité de larges bandes spectrales
- Forte réutilisation du spectre (petites cellules/réseaux hétérogènes)
- Très grande capacité multi-utilisateurs (directionnalité)

■ Flexibilité

- Agrégation de plusieurs bandes de fréquence (5G / 4G / WIFI)
- Mode TDD : liaison montante / descendante sur la même fréquence

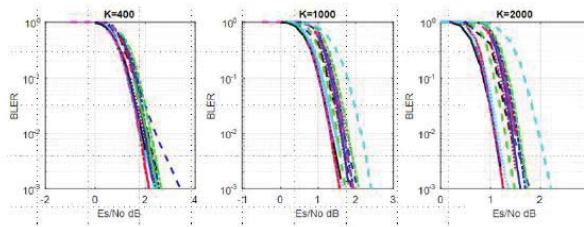




Progrès technologiques en émergence

■ Exploiter au mieux la ressource spectrale

- Optimiser l'attribution des fréquences aux utilisateurs (numérologie)
- Utiliser des modulations numériques plus complexes
- Codages bien adaptés des flux binaires pour rendre le signal reçu moins sensible aux perturbations / fluctuations



Annexe 3 :
Présentation de M. Marceau Coupechoux,
Professeur à Télécom ParisTech et à l'École Polytechnique

Les réseaux et l'algorithmique de la 5G: défis et innovations

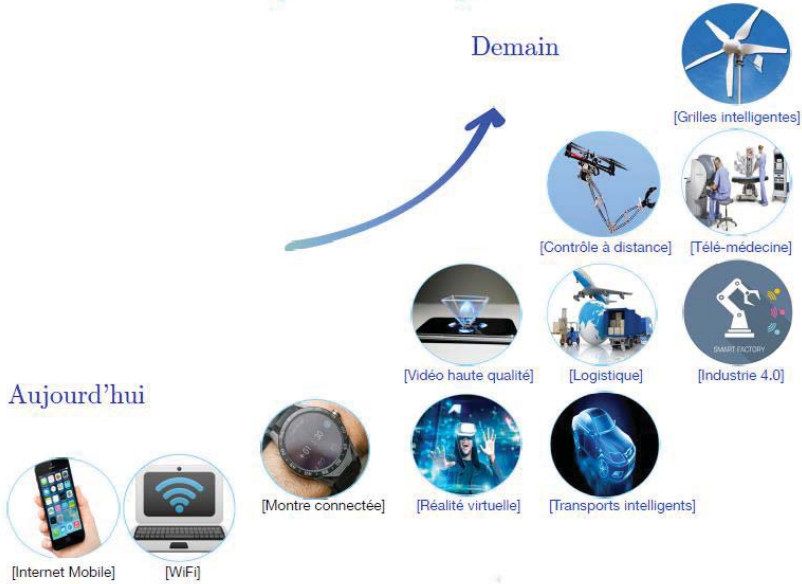
*Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et
technologiques*

Marceau Coupechoux

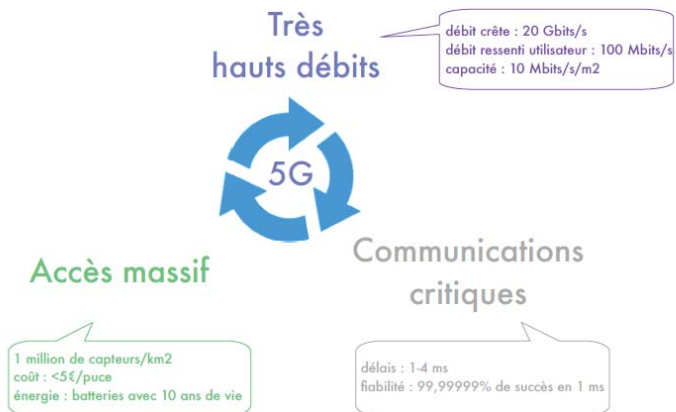
Professeur, Telecom ParisTech et École Polytechnique

8 novembre 2018

Les réseaux de prochaine génération



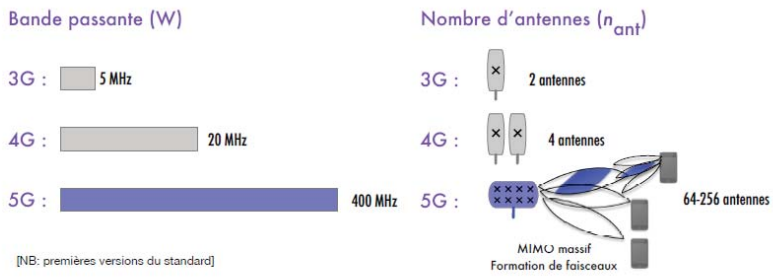
Les défis



[source: IMT-2020 ITU-R M.2410 débits voie descendante]

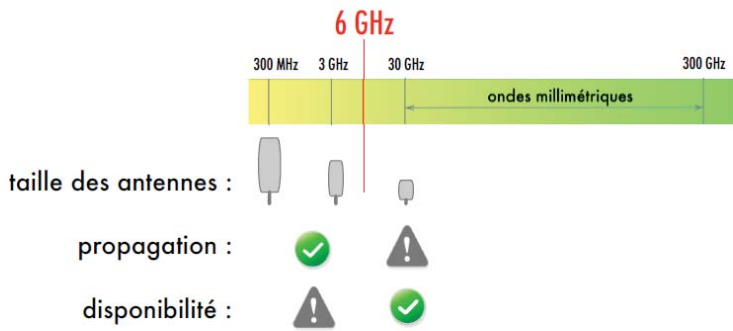
Très hauts débits

Capacité de Shannon : $C \approx n_{ant} W \log(1 + SNR)$

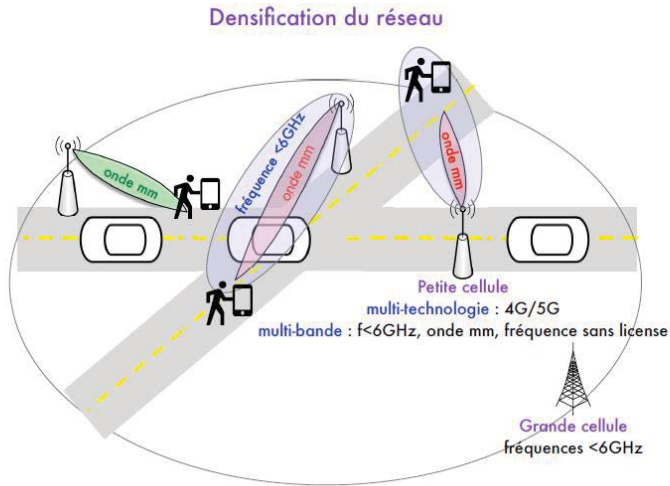


Très hauts débits

Spectre fréquentiel

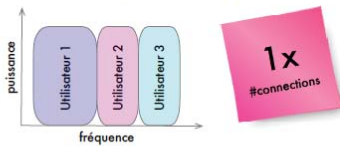


Très hauts débits

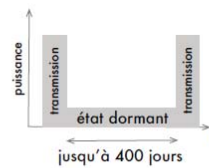


Accès massif

4G : accès orthogonal, sous-porteuses fixes

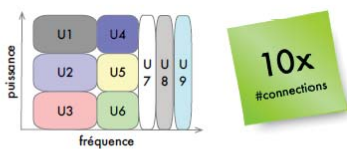


Économie d'énergie



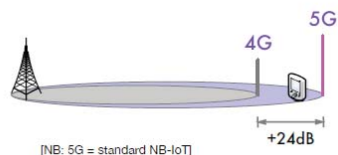
5G : accès non-orthogonal, sous-porteuses flexibles

[NB: standard NB-IoT]



[NB: NOMA prévu pour la phase 2, Source : IMT-2020]

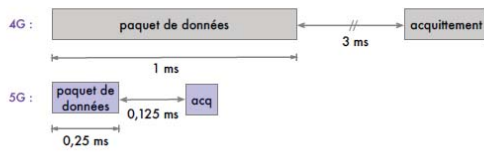
Grande couverture



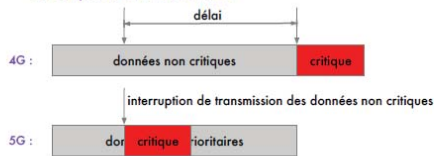
[NB: 5G = standard NB-IoT]

Communications critiques

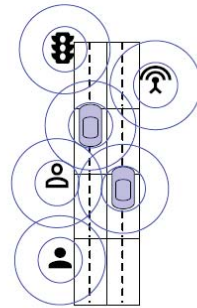
Très faible latence



Préemption des ressources

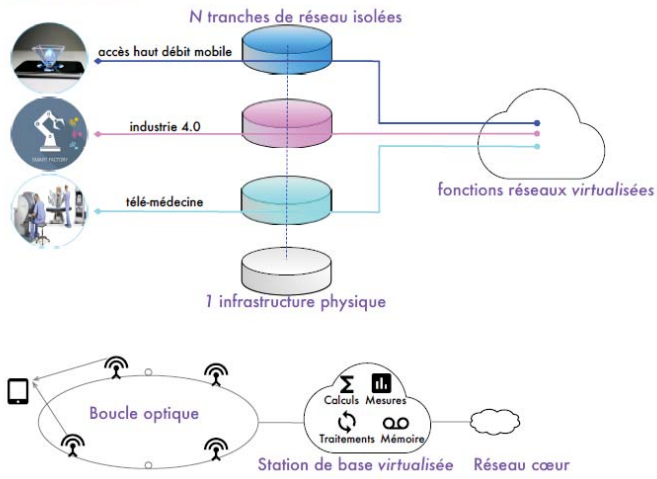


Communications directes entre terminaux



Gestion du réseau

Virtualisation



Annexe 4 :
Présentation de Mme Anne Laurent,
Directrice Mobile et Innovation de l'Autorité de régulation des communications
électroniques et des Postes (ARCEP)



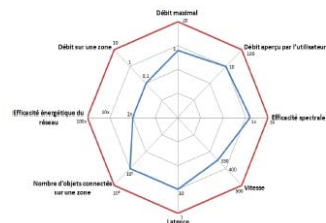
La feuille de route française en matière de 5G

Anne Laurent
Directrice Mobile et Innovation

5G : une génération de rupture

La 5G permettra d'**augmenter la capacité des réseaux, d'offrir des débits significativement plus élevés**, et rendra possible le développement de nombreux **services innovants** pour le grand public et les entreprises : **réalité virtuelle et augmentée, vidéo ultra haute définition, véhicule autonome, ville intelligente...**

- La 5G permet un **saut de performance** en termes de :
 - débit (x 10)
 - délai de transmission (/ 10)
 - fiabilité de la communication
- La 5G est un « *enabler* » de la numérisation de la société ; elle permettra de proposer des usages diversifiés dans des secteurs très variés : **voiture connectée, télémédecine, robotique, internet des objets**

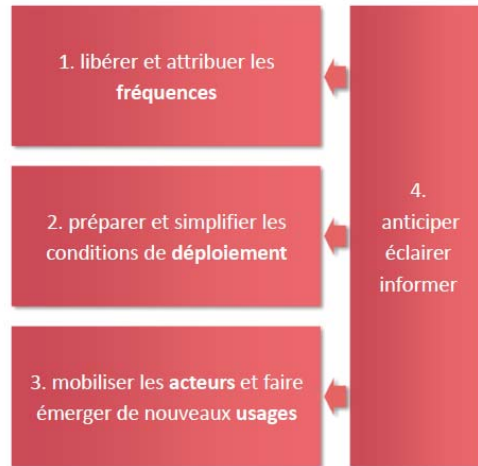


Les objectifs de la France

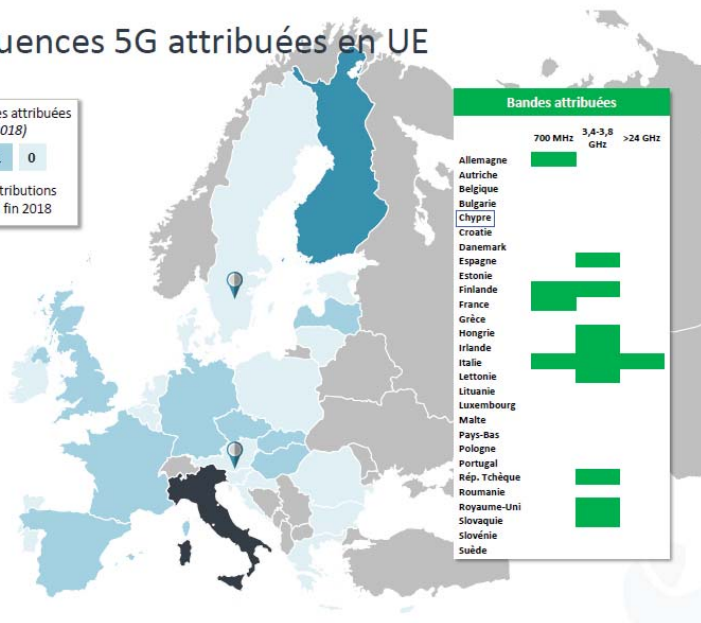


- Lancer dès maintenant plusieurs pilotes 5G sur une variété de territoires
- Accueillir des premières mondiales d'application de la 5G dans les domaines industriels
- En 2020 : des fréquences 5G attribuées et le déploiement commercial dans au moins une grande ville
- En 2025 : la couverture en 5G des axes de transports principaux

Programme de l'Arcep



Fréquences 5G attribuées en UE



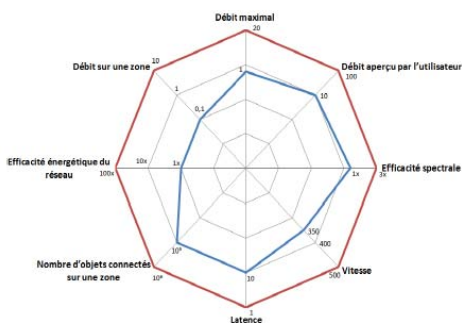
Calendrier des travaux 5G

- **Juillet 2018** : libération des bandes - consultation publique sur la bande L
- **Été 2018** : mise en place du comité prospectif sur les réseaux du futur
- **Octobre 2018** : consultation publique sur l'attribution des bandes
- **Automne 2018** : approfondissement avec les acteurs, dialogue avec les collectivités et travaux techniques
- **S2 2018** : réunions d'information et d'échanges sur des usages ciblés – véhicule autonome, industrie du futur...
- **Début 2019** : lancement de pilotes d'ampleur, événements 5G
- **A partir de mi-2019** : lancement de l'appel à candidatures



Performances de la 5G

- Les performances attendues de la 5G sont quantifiées via les 8 indicateurs suivants :



Performances/Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

- Les indicateurs ne pourront être tous satisfaits simultanément : **les réseaux 5G pourront à terme être configurés en « tranches » (slices)**, qui pourront s'adapter dynamiquement à la demande, en fonction des usages.



Les familles d'usage de la 5G

- On distingue généralement trois grandes familles d'usage de la 5G :

- eMBB – Enhanced Mobile Broadband :**

Correspond aux **applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, avec des capacités de débit plus importantes** (exemple : vidéos en ultra haute définition)

- mMTC – Massive Machine Type Communications :**

Correspond aux **usages qui nécessitent une couverture étendue, une consommation énergétique contenue, des débits relativement restreints** (exemple : Internet des objets)

- uRLLC – Ultra-reliable and Low Latency Communications :**

Correspond aux **applications nécessitant une réactivité extrêmement importante** ainsi qu'une **garantie très forte de transmission du message** (exemple : voitures connectées)



- Chaque famille sera caractérisée par des usages propres et des performances appropriées.



Annexe 5 :
Présentation de M. Gilles Brégant,
Directeur général de l'Agence nationale des fréquences (ANFR)

ANFR

Une richesse d'applications

- Très haut débit mobiles (4G) et demain la 5G
- TNT HD
- Internet des objets
- Villes intelligentes
- M-Santé
- Véhicules connectés
- Satellites (Télévision, Galileo, Copernicus, ...)
- Radars Météo, Aviation civile, Défense
- Microphones sans fil et caméras vidéo
- Systèmes d'armes
- Communications aéronautiques et maritimes
- Exploration de la Terre et de l'univers

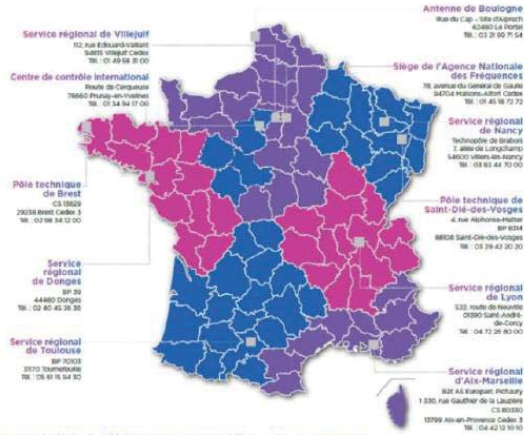
L'activité de nombreuses entreprises repose sur l'accès aux fréquences



Les principales missions de l'ANFR et ses implantations régionales



Négociation internationale « Diplomate du Spectre »
Gestion des droits nationaux « Notaire du Spectre »
Résolution des brouillages, surveillance, « Gardien du Spectre »
Transfert d'usages des bandes de fréquences « Financier »
Exposition du public aux ondes « Tiers de confiance »



Gérer un bien immatériel de l'Etat au bénéfice des usages
gouvernementaux et commerciaux

Le spectre est une ressource rare gérée à différents niveaux



La gestion des bandes de fréquences



Tableau national de répartition des bandes de fréquences

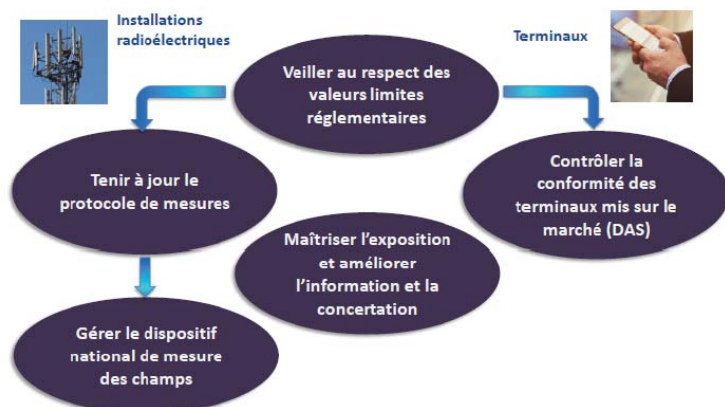


Les bandes de fréquences sont attribuées à 11 affectataires dont 2 AAI (ARCEP et CSA)

La 5G et l'enjeu de l'exposition du public aux ondes



L'ANFR a pour mission le contrôle de l'exposition du public aux ondes :



Feuille de route 5G gouvernementale : permettre la confiance du public, informer et surveiller



VEILLER, MESURER



- Veiller aux valeurs limites d'exposition du public aux ondes
- Gérer le dispositif national de surveillance et de mesures des ondes

DIALOGUER



- Le Comité National de Dialogue mis en place au sein de l'ANFR : 1^{ère} réunion prévue le 12 décembre
- Sur le terrain, des réunions sont prévues avec les collectivités

DIFFUSER L'INFORMATION



- Les études de terrain et les résultats des mesures d'exposition seront publiés en toute transparence sur le site de l'ANFR
- Actuellement, plus de 40 000 mesures sont publiées sur CARTORADIO

Pilotes 5G



L'ANFR est impliquée dans les premiers pilotes 5G autorisés dans la bande 3,4 – 3,8 GHz :



Réunions mairie – ANFR – opérateur :

- Lyon le 11 avril 2018
- Marseille le 12 septembre 2018
- Chatillon le 9 novembre 2018
- Pau le 15 novembre 2018

Actions menées :

- Réaliser des mesures d'exposition sur le terrain
- Participer aux comités de normalisation sur l'exposition 5G (IEC TC106)

Objectifs:

- Définir un indicateur de l'exposition réelle
- Définir la méthode d'extrapolation pour établir la conformité

Documents:

- Protocole de mesures
- Périmètres de sécurité
- Lignes directrices nationales sur la simulation
- Définition des points atypiques
- Règles sur les établissements particuliers

Annexe 6 :
Présentation de M. Olivier Merckel,
Chef de l'unité d'évaluation des risques à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES)



Comprendre les interactions entre radiofréquences et santé à l'heure de la 5G

Opecst – 8 novembre 2018

Depuis 1997, environ 200 millions de \$ affectés, selon l'OMS, à la recherche sur les effets des radiofréquences sur la santé



Programme National de Recherche en Environnement-Santé-Travail

Appel à projets 2018 « Radiofréquences et santé »

Date limite de dépôt des lettres d'intention : 19 décembre 2017
Date limite de dépôt des dossiers complets : 19 avril 2018

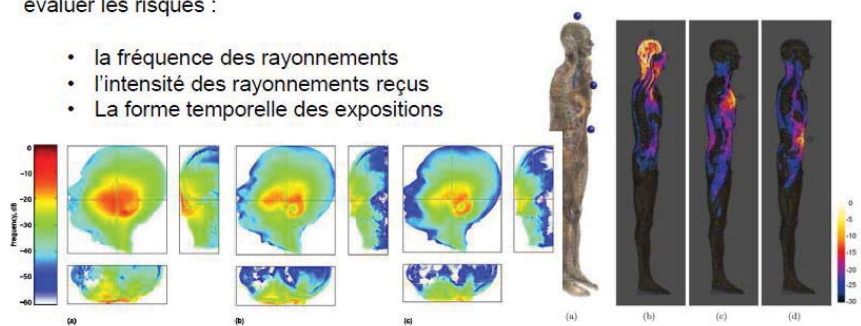
RF Research Agenda recommendations	
Health effects research	
Priority	Epidemiology
High	Prospective cohort studies of children and adolescents with outcomes including behavioural and neurological disorders and cancer
High	Monitoring of brain tumour incidence trends through well-established population-based cancer registries, if possible combined with population exposure data
Other	Case-control studies of neurological disease provided that objective exposure data and confounder data are available and reasonable participation is achieved
Human studies	
High	Further RF/EMF provocation studies on children of different ages
High	Provocation studies to identify neurobiological mechanisms underlying possible effects of RF on brain function, including sleep and resting EEG
Animal studies	
High	Effects of early-life and prenatal RF exposure on development and behaviour
High	Effects of RF exposure on ageing and neurodegenerative diseases
Other	Effects of RF exposure on reproductive organs
Cellular studies	
Other	Identify optimal sets of experimental tests to detect cellular response after exposure to new RF technologies and co-exposures of RF/EMF with environmental agents
Other	Further studies on the influence of genetic background and cell type: possible effects of mobile phone type RF exposure on a variety of cell types using newer, more sensitive methods less susceptible to artefact and/or bias
Mechanisms	
None	
Dosimetry	
High	Assess characteristic RF/EMF emissions, exposure scenarios and corresponding exposure levels for new and emerging RF technologies, also for changes in the use of established technologies
High	Quantify personal exposures from a range of RF sources and identify the determinants of exposure in the general population
Other	Monitoring of personal exposure of RF workers





Les caractéristiques des champs électromagnétiques en jeu pour évaluer les risques :

- la fréquence des rayonnements
- l'intensité des rayonnements reçus
- La forme temporelle des expositions



Les études :

- expérimentales : *in vitro*, *in vivo*
- épidémiologiques

5G

Une feuille de route ambitieuse pour la FRANCE

16 juillet 2018



CHANTIER N°4 – ASSURER LA TRANSPARENCE ET LE DIALOGUE SUR LES DÉPLOIEMENTS ET L'EXPOSITION DU PUBLIC

Le déploiement de la 5G va entraîner le déploiement de nouvelles stations de base et susciter un besoin d'information du public sur les conséquences de ce déploiement vis-à-vis de l'exposition aux champs électromagnétiques.

Les limites d'exposition aux champs électromagnétiques sont fixées par le cadre réglementaire et s'appliquent indépendamment de la technologie (2G, 3G, 4G ou 5G). Les réseaux 5G qui seront déployés par les opérateurs devront donc respecter ces valeurs limites tout autant que les technologies en place aujourd'hui.

Le Gouvernement travaille avec l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) et l'ANFR (Agence Nationale des Fréquences) pour qu'elles puissent examiner l'exposition aux ondes électromagnétiques et l'impact éventuel de ces nouveaux développements technologiques, dès la phase des expérimentations. L'ensemble de ces travaux feront l'objet d'échanges avec les parties prenantes dans le cadre des comités de dialogue mis en place par l'ANFR et l'ANSES.

